

Viktor Blinka

Měření charakteristiky dýzy na vodní trati

Measurement of Nozzle Characteristics to the Water Circle

Bakalářská práce

Vedoucí práce:

Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Ostrava 2021

Bibliografický záznam

Autor: Viktor Blinka, BLI0031

Název práce: Měření charakteristiky dýzy na vodní trati

Studijní program: B2341 Strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

Počet stran: 48

Klíčová slova: kavitační parametry, charakteristika dýzy, ztrátový součinitel, objemový zlomek vzduchu.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BLINKA, Viktor. *Měření charakteristiky dýzy na vodní trati: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2021, 48 s. Vedoucí práce: Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá charakteristikou konvergentní – divergentní dýzy kruhového průřezu při proudění vody. V teoretické části se zabývám teorií kavitace, vlivem fyzikálních vlastností kapaliny na vznik kavitace a prouděním kapaliny zúženým průřezem. V praktické části jsem měřil charakteristiku dýzy v oblasti turbulentního proudění, s kavitací i bez ní, a definoval jsem ztrátový součinitel a výtokový součinitel při proudění bez kavitace. V práci je vyhodnocen počáteční kavitační součinitel pro danou geometrii při proudění vody, obsah vzduchu v proudící kapalině a pomocí záznamů z vysokorychlostní kamery také délka kavitační oblasti.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BLINKA, Viktor. *Measurement of Nozzle Characteristics to the Water Circule: Bachelor thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic equipment, 2021, 48 p. Thesis head: Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Bachelor thesis deals with characteristics of a convergent – divergent nozzle of circular section when the water flows through it. In the theoretical section, I deal with theory of cavitation, effects of physical properties of the liquid on creation of cavitation and the flow of liquid through narrowed cross section. In the practical section, I measured characteristics of a nozzle in the area of turbulent flow, with and without the effect of cavitation, and I defined both loss coefficient and outflow coefficient during the flow of liquid without cavitation. The thesis includes an evaluation of the initial cavitation coefficient related to a proper geometry during the flow of water and the amount of air in it, and with help of a high speed camera, it also includes an evaluation of the length of the cavitation area.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	5
1. ÚVOD	7
2. CÍLE PRÁCE.....	7
3. KAVITACE	8
3.1. HISTORIE KAVITACE	8
3.2. KAVITAČNÍ JÁDRA A BUBLINY	8
3.3. VÝVOJ A TYPY KAVITACÍ.....	10
3.4. KAVITAČNÍ PARAMETR	11
4. VLIV FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ KAPALINY NA KAVITACI	12
4.1. VLIV POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ	12
4.2. VLIV VIZKOZITY	12
4.3. VLIV OBSAHU VZDUCHU A HENRYHO ZÁKON	13
4.4. VLIV TEPLoty KAPALINY	14
5. ÚČINKY KAVITACE.....	16
5.1. OPOTŘEBENÍ MATERIÁLU.....	16
5.2. KAVITAČNÍ HLUK A VIBRACE.....	17
6. VYUŽITÍ KAVITACE	17
7. KAVITACE V HYDRAULICKÝCH SYSTÉMECH	19
7.1. VENTURIHO TRUBICE.....	19
7.2. PRŮTOK ŠKRTICÍMI OTVORY.....	20
8. NÁVRH MĚŘICÍHO OBVODU	22
8.1. POPIS MĚŘICÍHO OBVODU A.....	22
8.2. POPIS MĚŘICÍHO OBVODU B	25
9. MĚŘENÍ HYDRAULICKÝCH VELIČIN A JEJICH VYHODNOCENÍ	28
9.1. POSTUP MĚŘENÍ NA OBVODU A	28
9.2. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO OBVOD A	29
9.3. POSTUP MĚŘENÍ NA OBVODU B	32
9.4. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO OBVOD B	34
9.5. GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT	37
9.6. VYHODNOCENÍ VIDEOZÁZNAMŮ	42
10. ZÁVĚR	45
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	47
SEZNAM PŘÍLOH	48

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

B	[1]	termodynamické kritérium
c	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
C_i	$[\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}]$	koncentrace nasycení vody plynem
c_p	[1]	tlakový součinitel
$D; d$	[m]	průměr
e_r	[J]	měrná energie
f	[Hz]	frekvence
g	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	tíhové zrychlení
h	[m]	tlaková výška
K	[1]	kavitační parametr
K_i	$[\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}]$	absorpční koeficient
L	[dB]	hladina kavitačního hluku
l	[m]	délka
M	$[\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}]$	hmotnostní úbytek za hodinu
M	$[\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$	molární hmotnost
p	[Pa]	tlak
p_b	[Pa]	atmosférický tlak v den měření
P_i	[1]	parciální tlak plynu
p_K	[Pa]	tlak kapaliny v okolí bubliny
p_{min}	[Pa]	minimální tlak
p_v	[Pa]	tlak plynu v bublině
p_w	[Pa]	tlak nasycených par
R	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}]$	univerzální plynová konstanta
R	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-7}]$	odporový součinitel
r	[m]	poloměr
r	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrné výparné teplo
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
T	[K]	termodynamická teplota
t	[°C]	teplota
V	$[\text{m}^3]$	objem
v	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	rychlost
v	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrný objem
Y	[1]	hmotnostní zlomek vzduchu
α	[1]	objemový zlomek vzduchu
α_n	[1]	objemový zlomek vzduchu při nasyceném stavu
η	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	dynamická viskozita
μ	[1]	výtokový součinitel
ν	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
ξ	[1]	ztrátový součinitel
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota
σ	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$	povrchové napětí

Indexy

B	bublina
K	kapalina
kav	kavitační
kr	kritická hodnota
w	pára
0	počáteční stav
1	vstup
2	výstup

1. ÚVOD

Kavitace v hydraulických systémech je jedním z nejproblematictějších jevů. Projevuje se vznikem kavitačních dutin, které ve výsledku mohou způsobit nejen hluk a vibrace, ale také vážné mechanické opotřebení součástí.

Ve své bakalářské práci zpracuji teorii ke kavitaci při proudění vody a k vyhodnocení ztrátového součinitele. Dále popíšu trať pro měření charakteristiky dýzy kruhového průřezu. Bude provedeno měření hydraulických parametrů dýzy (průtok, tlaky na vstupu a výstupu z dýzy, teplota vody a obsah vzduchu ve vodě) a také bude pořízen videozáznam měření za pomoci vysokorychlostní kamery, ze kterého následně vyhodnotím délku kavitační oblasti. Všechny naměřené hodnoty následně matematicky a graficky vyhodnotím. Cílem měření je vyhodnocení charakteristiky konvergentní – divergentní dýzy kruhového průřezu a definování počátečního kavitačního čísla, získání hodnot ztrátového součinitele a výtokového součinitele pro hodnoty, za nichž nevzniká kavitace, a také zjištění množství vzduchu ve vodě.

2. CÍLE PRÁCE

- Zpracování teorie ke kavitaci při proudění vody, včetně vlivů fyzikálních vlastností kapaliny na vznik kavitace, účinků kavitace a využití kavitace, a vyhodnocení ztrátového součinitele.
- Popsání měřicí trati pro měření charakteristiky dýzy, včetně nakreslení schématu obvodu a uvedení parametrů klíčových prvků. Kapalina bude nasávána z nádrže čerpadlem, následně proteče přes průtokoměr a dýzu. Před a za dýzou budou umístěny snímače tlaku a do nádrže bude zapuštěn snímač teploty a kyslíku. Budou poznamenány naměřené hodnoty tlaků, průtoku, teploty a obsahu kyslíku ve vodě.
- Popsání metodiky měření a vyhodnocení, s cílem definovat hodnotu počátečního kavitačního čísla a ztrátového součinitele a také zjistit množství vzduchu ve vodě.
- Provedení samotného měření na uvedené trati a zapsání naměřených hodnot, které dále poslouží k výpočtům.

3. KAVITACE

3.1. HISTORIE KAVITACE

První zmínky o kavitačním jevu sahají až do poloviny 18. století, kdy je švýcarský fyzik a matematik Leonard Euler naznačil ve své teorii vodních turbín. Poukazoval na nesrovnalosti mezi teoretickou a prakticky získanou charakteristikou způsobenou nedostačujícím tlakem v dokonalé kapalině [1].

S kavitací se v praxi setkáváme až v roce 1894 u pokusného torpédoborce Turbinia s turbínovým pohonem. Výsledky testů byly neuspokojivé, kavitace způsobovala razantní pokles předpokládané rychlosti [1].

V roce 1895 byl kavitační jev poprvé popsán v literatuře. S. W. Barnaby pokles výkonu vysvětlil tvorbou bublin na lodním šroubu. Lodní šroub pracoval dle očekávání při nízkých otáčkách, při jejich zvýšení se však tažná síla zmenšovala a po nějaké době na něm bylo pozorováno rozrušení povrchu [1].

V rámci výzkumu kavitačního jevu byly zjištěny podmínky vzniku. Tlak proudící kapaliny musí poklesnout na hodnotu tlaku nasycených par, odpovídající teplotě kapaliny. Ve 20. letech 20. století bylo pomocí několikaletých experimentů zjištěno, že kavitační korozi nejlépe odolává nerezavějící ocel [1].

3.2. KAVITAČNÍ JÁDRA A BUBLINY

Kavitační bubliny vznikají v místech, kde dochází k porušení soudružnosti kapaliny. Aby k porušení mohlo dojít, musí být překonány kohezní síly molekul. Projevem kohezních sil je objemová pružnost kapaliny, která se rozděluje podle stupně nečistot. Absolutně čistá voda má objemovou pružnost 1 013 MPa a vypočítá se podle Bogačeva. Kapalina s různými příměsi má pružnost přibližně 202 MPa a vypočítá se podle Zeldoviče. Experimentálně bylo zjištěno, že se objemová pružnost skutečné kapaliny pohybuje v rozmezí $10^4 - 10^6$ Pa, což je značně méně, než hodnota u čisté vody [2].

Za předpokladu, že kavitační jádro má tvar bubliny o poloměru r_B , platí podmínka rovnováhy

$$p_B = p_K + \frac{2\sigma}{r_B}, \quad (3.1)$$

kde p_K [Pa] je tlak v kapalině v okolí bubliny a σ [N·m⁻¹] je povrchové napětí. Tlak v bublině je tedy vyšší než tlak v okolní kapalině, přesněji o hodnotu $\frac{2\sigma}{r_B}$. Dále je také předpokládáno, že kulová bublina obsahuje páry a plyn kapaliny, tudíž může být využito Daltonova zákona

$$p_B = p_w + p_v, \quad (3.2)$$

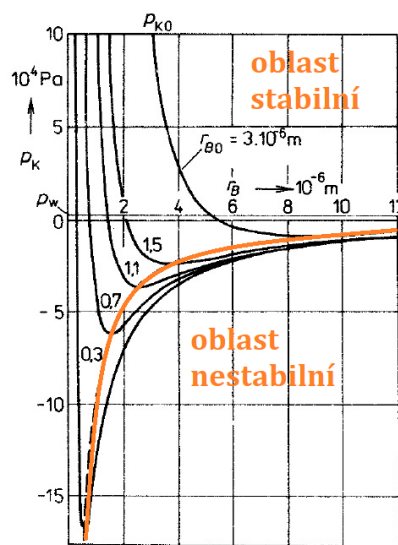
kde p_v je tlak plynu a p_w je tlak nasycených par. Kombinací těchto poznatků lze vyvodit novou podmínku rovnováhy (2.3) [2].

$$p_B = p_K + \frac{2\sigma}{r_B} = p_w + p_v \quad (3.3)$$

Za předpokladu, že se při změně poloměru hmotnost plynu nemění, dostane se nový vztah pro tlak okolní kapaliny

$$p_K = p_w + \left(p_{K0} - p_w + \frac{2\sigma}{r_{B0}} \right) \cdot \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 - \frac{2\sigma}{r_B}. \quad (3.4)$$

Index 0 označuje výchozí hodnoty tlaku a poloměru. Uvedená závislost je znázorněna na diagramu na Obr. 3.1. Spojnice minim jednotlivých křivek, kterými jsou kritické hodnoty, zapisující se jako r_{kr} a p_{kr} , je znázorněna oranžovou křivkou, která rozděluje graf na Obr. 3.1 podle rovnováhy na stabilní a nestabilní [2].



Obr. 3.1 – Závislost rovnovážného tlaku v kapalině na poloměru bubliny pro hodnoty: $p_w = 2\,337\text{ Pa}$, $p_{K0} = 1,013 \cdot 10^5\text{ Pa}$, $\sigma = 72,78 \cdot 10^{-3}\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ a r_{B0} vyjadřuje různé hodnoty počátečního poloměru bubliny (parametr) [2]

Z Obr. 3.1 je patrné, že při zvětšení hodnoty r_B (pro $r_B < r_{kr}$, při konstantním p_K) bude v kapalině tlak vyšší než tlak odpovídající zvětšenému poloměru. Z toho důvodu dojde ke zmenšování poloměru zpět na rovnovážnou hodnotu. V případě, že bude r_B z oblasti $r_B > r_{kr}$, bude tlak nižší než tlak odpovídající tomuto zmenšenému poloměru. Bublina se tedy bude zvětšovat a nastane nestabilní rovnováha. Při snižování okolního tlaku pro $r_B < r_{kr}$ se poloměr jen lehce zvětšuje. Až při hodnotách blízcích se r_k se začne bublina prudce

zvětšovat. Z diagramu je také patrné, že k jevu dochází při hodnotách tlaku, které jsou nižší než p_w . Pro úvahu se proto předpokládá, že hodnoty p_w jsou v celém průběhu konstantní [2].

Kritický poloměr bubliny se vypočítá

$$r_{kr} = r_{B0} \cdot \sqrt{\frac{3r_{B0}}{2\sigma} \cdot p_{v0}}, \quad (3.5)$$

kde počáteční tlak v plynu se vypočítá

$$p_{v0} = p_{K0} - p_w + \frac{2\sigma}{r_{B0}}. \quad (3.6)$$

Výraz r_{kr} nahradí ve vzorci (2.5) výraz r_B a úpravou se získá nový vzorec pro kritický tlak p_{kr} a kritický poloměr r_{kr} :

$$p_{kr} = p_w - \frac{2}{3} \cdot \frac{2\sigma}{r_{B0}} \cdot \sqrt{\frac{2\sigma}{3r_{B0}} \cdot \frac{1}{p_{v0}}} = p_w - \frac{2}{3} \cdot \frac{2\sigma}{r_{kr}}, \quad (3.7)$$

$$r_{kr} = \frac{4\sigma}{3 \cdot (p_w - p_{kr})} [2]. \quad (3.8)$$

Ze vztahu pro kritický tlak p_{kr} a z Obr. 3.1 vyplývá, že čím menší je počáteční poloměr r_{B0} , tím je nižší kritický tlak p_{kr} . Tomuto tlaku odpovídá tlak určující vznik kavitace. Z rovnice pro kritický poloměr r_{kr} však vyplývá, že kritický poloměr r_{kr} a počáteční poloměr bubliny r_{B0} jsou navzájem úměrné [2].

Pokud se kavitační bublina dostane do oblasti vyššího tlaku (kde $p_K < p_{kr} < p_w$), páry v ní obsažené začnou prudce kondenzovat, čímž se začne bublina smršťovat (implodovat). Plyny částečně pronikají do okolní kapaliny. Okolní kapalina začne vnikat do takto uvolněného prostoru a zbytek plynů se stlačuje. Lze předpokládat, že vlivem deformací bubliny dochází k rázům a vyzařování tlakových vln, které působí na obtékané těleso a jeho materiál narušují korozivní erozí [2].

3.3. VÝVOJ A TYPY KAVITACÍ

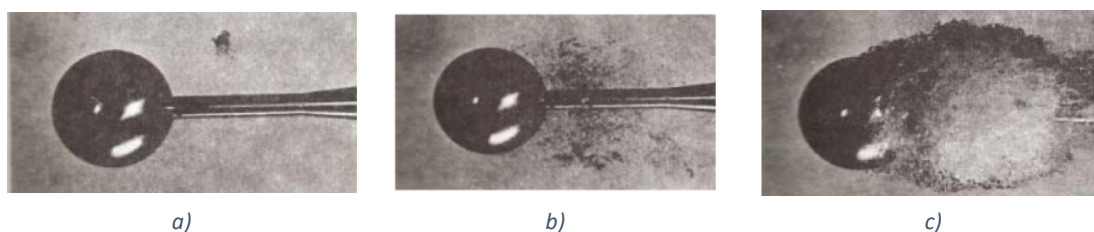
Kavitační jádra o různých velikostech jsou obsažena v proudící kapalině. Stejně velká jádra při dosažení kavitačního tlaku explodují současně. Aby bublina (kavitační jádro) dorostlo do kritické velikosti (rovnice (3.8)), potřebuje určitý čas (lze předpokládat hodnoty v μs nebo ms). Menší jádra potřebují delší čas, aby dosáhla kritické velikosti a proto nemusí „stihnout“ explodovat [2].

Bylo prokázáno, že kavitace v blízkosti obtékané stěny vzniká přibližně uprostřed mezní vrstvy. Dochází k tomu při tlaku vyšším, než je příslušné napětí par. Mezi příčiny

se dá zařadit fakt, že kavitační jádra sídlí na povrchu tělesa, dále že se v turbulentní mezní vrstvě vyskytují víry. Kavitační jádra jsou do zmíněných vírů vtahována a v důsledku sníženého tlaku uvnitř víru ve srovnání s okolím dochází ke vzniku kavitační bubliny. Okamžik explozivního růstu kavitační bubliny se nazývá **počátek kavitace** (viz Obr. 3.2 a) [2].

Shluk kavitačních bublin tvoří kavitační oblast, která je ohraničena kapalinou, nebo pevnou stěnou. Pojmem **plně vyvinutá kavitace** (viz Obr. 3.2 c) je myšlena kavitace, která je vyvinutá do té míry, že kavitační oblast ovlivňuje proudové poměry v hydraulickém stroji či zařízení s takovou mírou, že jsou ovlivněny hodnoty průtoku a účinnosti [2].

Kavitace, jejíž stupeň vývoje se nachází mezi počátkem kavitace a vyvinutou kavitací se nazývá **částečně vyvinutá kavitace** (viz Obr. 3.2 b) [2].



Obr. 3.2 – Vývoj kavitací: a) počátek kavitace, b) částečně vyvinutá kavitace, c) plně vyvinutá kavitace [2]

3.4. KAVITAČNÍ PARAMETR

Kavitaci je nutno posuzovat celistvě, nelze si vystačit pouze se členěním kavitace. Z tohoto důvodu byl zaveden kavitační parametr K . Při obtékání tělesa nastane podél jeho povrchu proměnné obtékání tlaku. Rozdíl tlaku p na zkoumaném povrchu a tlaku p_1 v místě vstupu (kde proudění není ovlivněno prvkem), vztažený na dynamický tlak $\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2\right)$ v tomto místě, lze určit tlakový součinitel

$$c_p = 2 \cdot \frac{p - p_1}{\rho \cdot v_1^2} = 1 - \left(\frac{v}{v_1}\right)^2. \quad (3.9)$$

Rozdíl tlaků je způsoben dynamikou proudu. Na určitém místě je dosažen nejnižší tlak p_{min} (s maximální rychlostí proudu v_{max}), čímž je dosažen minimální tlakový součinitel

$$c_{pmin} = 2 \cdot \frac{p_{min} - p_1}{\rho \cdot v_1^2}, \quad (3.10)$$

jehož hodnota závisí na tvaru obtékané části. Teoreticky by tlak p_{min} mohl klesnout na jakoukoliv zápornou hodnotu. Při obtékání je však tlak omezen vznikem kavitace, která se objeví až při dosažení kavitačního tlaku p_{kav} a tlakovém součiniteli

$$c_{pkav} = 2 \cdot \frac{p_{kav} - p_1}{\rho \cdot v_1^2}. \quad (3.11)$$

Snížení tlaku na hodnotu p_{kav} lze dosáhnout buď snížením tlaku p_1 , nebo zvýšením rychlosti proudu v_1 [2].

Obecně se předpokládá, že platí tato podmínka: $p_w = p_{kav}$, tedy že tlak nasycených par kapaliny p_w při dané teplotě se rovná kavitačnímu tlaku p_{kav} . Z těchto poznatků lze sestavit vzorec pro výpočet kavitačního parametru

$$K = \frac{2 \cdot (p_1 - p_w)}{\rho \cdot v_1^2}. \quad (3.12)$$

Je však nutné brát v úvahu, že za předpokladu rovnosti výše zmíněných tlaků bude platit $K = -c_{pkav}$.

Hodnota K , při které vzniká první kavitační bublina, se nazývá kavitační parametr pro počátek kavitace K_0 . Obecně platí, že při $K > K_0$ je proudění je bezkavitační, zatímco při $K < K_0$ je proudění s kavitací. Hodnota K , při které dojde k omezení maximálního průtoku, se nazývá kritický kavitační parametr K_{kr} .

4. VLIV FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ KAPALINY NA KAVITACI

Nejzásadnější vlastnosti kapaliny ovlivňující kavitaci jsou viskozita, povrchové napětí, obsah plynu v kapalině a teplota [2].

4.1. VLIV POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ

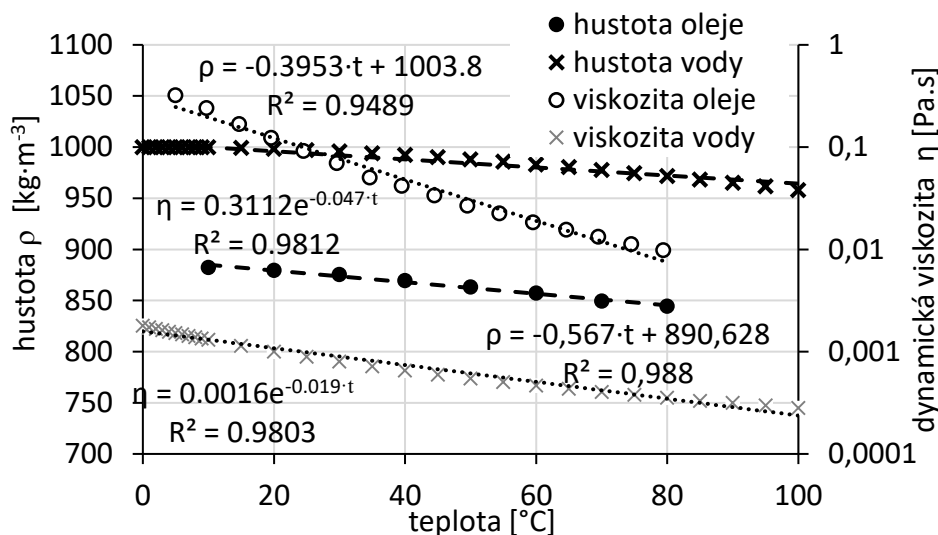
Ze vztahu (3.2) vyplývá, že s rostoucím povrchovým napětím σ klesá kavitační tlak a zpomaluje se růst kavitační bubliny, ale urychluje se její zánik. Z toho lze vyvodit, že povrchové napětí σ má největší vliv při vzniku a při zániku kavitační bubliny. S růstem počtu kavitačních jader se také snižuje pevnost kapaliny [2].

4.2. VLIV VSKOZITY

Teoretické úvahy ukazují, že kavitační bublina roste ve viskózní kapalině pomaleji než v ideální. Antikavitační vlastnosti by se tedy měly zlepšovat s rostoucí viskozitou. Bylo však prokázáno, že kavitační parametr pro počátek naopak vzrůstá s Reynoldsovým číslem. Tato závislost platí pro hodnoty Re od $1,5 \cdot 10^5$ do $6 \cdot 10^5$. Pro hodnoty $Re < 1,5 \cdot 10^5$ kavitační parametr s klesajícím Re vzrůstá. Křivka má tedy minimum v $Re = 1,5 \cdot 10^5$ [2].

S rostoucím Reynoldsovým číslem Re se při obtékání válcového tělesa zvyšuje kavitační parametr K pro počátek kavitace. Z toho je patrná závislost mezi průměrem tělesa a kavitačním parametrem, kdy se zvětšením průměru poroste i kavitační parametr [2].

Na hustotu a viskozitu má také důležitý vliv teplota. Obecně platí, že s rostoucí teplotou klesá hodnota dynamické viskozity. Tento pokles je výraznější pro olej, než-li pro vodu. Jak je vidět na Obr. 4.1 [12].



Obr. 4.1 – Graf závislosti hustoty a dynamické viskozity na teplotě [12]

4.3. VLIV OBSAHU VZDUCHU A HENRYHO ZÁKON

Pokud se v kapalině vyskytují větší kavitační jádra, tak se kavitační tlak zvětšuje, tudíž může expanzivní růst bubliny nastat i při $p_w < p_{kr}$. To usnadňuje vznik kavitace. S obsahem vzduchu roste $K_{poč}$. Vlivem difúze plynu z okolí kapaliny do bubliny může dojít k značnému nárůstu bubliny. K difúzi dochází za podmínky $\frac{\alpha}{\alpha_n} > 1$, kde α je poměr objemu vzduchu k objemu kapaliny a α_n je poměr objemu vzduchu rozpuštěného v kapalině při nasyceném stavu k objemu kapaliny. Dochází tedy k difúzi při přesycenosti kapaliny vzduchem [2].

Doba potřebná pro nárůst jádra vlivem difúze do kritické velikosti se pohybuje v rozsahu od 30 do 100 ms. Z toho lze vyvodit, že při rychlosti proudění $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ urazí jádro vzdálenost od 0,3 do 1 m. U velkých strojů jsou tyto rozměry reálné, díky čemuž mohou jádra během pobytu v oblasti s kritickým tlakem dorůst do kritické velikosti a expandovat [2].

Koncentrace rozpuštěného plynu C_i ve vodě je přímo úměrná parciálnímu tlaku plynu P_i nad její hladinou. Tuto závislost vysvětluje Henryho zákon

$$C_i = K_i \cdot P_i, \quad (4.1)$$

kde hodnota K_i je absorpční koeficient charakterizující rozpustnost plynu v závislosti na teplotě. Čím je teplota vody vyšší, tím méně plynu se rozpustí v kapalině. Jednotkou absorpčního koeficientu je $[\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}]$ a jeho hodnoty jsou vypsány v Tab. 4.1 [6].

Tab. 4.1 – Hodnoty absorpčního koeficientu pro kyslík a oxid uhličitý za tlaku 100 000 Pa [6]

$T [^{\circ}\text{C}]$	0	10	20	30
$K_i (\text{O}_2) [\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}]$	70	54	43	36
$K_i (\text{CO}_2) [\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}]$	3380	2360	1730	1310

Celkový tlak plyné směsi P je roven součtu jednotlivých parciálních tlaků P_i . Parciální tlak jedné složky je roven tlaku, který by tato složka měla za teploty T a celkového objemu V plyné směsi, tedy je přímo úměrný procentu tohoto objemu ve vzduchu [6].

4.4. VLIV TEPLoty KAPALINY

V literatuře [13],[14] bylo prokázáno, že se s rostoucí teplotou zlepšují antikavitační vlastnosti kapaliny, což je vysvětleno termodynamickým účinkem kapaliny na kavitaci [2].

Toto tvrzení platí pouze pro vodu. Bylo rovněž prokázáno, že u oleje se s rostoucí teplotou kavitační vlastnosti kapaliny zlepšují [5].

Aby kavitace bylo možno dosáhnout, musí v kavitační oblasti dojít k vypařování kapaliny, k tomu je však třeba dodat teplo z okolní oblasti. Tím je docíleno teplotního spádu ΔT mezi okolní kapalinou a kavitační oblastí (okolní kapalina má vyšší teplotu než kapalina v kavitační oblasti). Kavitační tlak p_{kav} (tlak nasycených par v kavitační oblasti) bude nižší než p_w (tlak nasycených par okolní kapaliny) [2].

Pro posouzení termodynamických vlivů zavedli Stahl a Stepanoff termodynamické kritérium (zvané také index gravitace), které udává poměr objemu páry k původnímu objemu kapaliny,

$$B = \frac{V_w}{V_K} = \frac{v_w}{v_K} \cdot Y, \quad (4.2)$$

kde V je objem, v je měrný objem a Y je hmotnostní zlomek vzduchu v kapalině [2].

Do kavitační oblasti přechází z okolní kapaliny teplo potřebné na vypaření a vykonání expanzní práce.

$$Y \cdot r = c_K \cdot \Delta T - v_K \cdot \Delta p. \quad (4.3)$$

Nastane-li podmínka $c_K \cdot \Delta T \gg v_K \cdot \Delta p$, lze vzorce (4.2) a (4.3) spojit a získat vzorec pro snížení teploty

$$\Delta T = B \cdot \frac{r \cdot v_K}{c_K \cdot v_w} \quad [2]. \quad (4.4)$$

Využitím Clapeyron – Clausiova vztahu $\frac{r}{v_w - v_K} = \frac{T}{\Delta T} \cdot \Delta p$, kde r je měrné výparné teplo, a kde uvažujeme $v_w - v_K \cong v_w$, získáme rovnici pro pokles tlaku

$$\Delta p = \frac{B}{c_K \cdot v_K \cdot T \cdot \left(\frac{c_K}{r \cdot v_K}\right)^2} \quad [2]. \quad (4.5)$$

Tab. 4.2 – Snížené teploty a tlaky v kavitační oblasti při $B = 10$ [2]

t	[°C]	21	40	82	100	121	149
ΔT	[K]	0,1	0,3	1,74	3,17	6,07	12,62
Δp	[Pa]	16	112	3 600	11 130	39 200	145 369

Tab. 4.2 jsou uvedeny hodnoty ΔT a Δp v závislosti na teplotě vody (pro $B = 10$). Lze z nich vyvodit, že s rostoucí teplotou vody prudce stoupá teplotní i tlakový rozdíl. Pro chladnou kapalinu je však termodynamický vliv zanedbatelný. Při vyšší teplotě vody, stejně vyvinuté kavitaci, $B = \text{konst.}$, se musí tlak okolí kapaliny snížit pod napětí nasycených par p_w o hodnotu Δp , která tedy vyjadřuje zlepšení kavitačních vlastností. Pro studenou vodu platí předpoklad $p_{kav} = p_w$, zatímco pro horkou platí $p_{kav} < p_w$ [2].

Jelikož se zkoušky hydraulických strojů a zařízení provádějí za použití studené vody, je třeba výsledky pro hodnoty horké vody přepočítat,

$$K = K_w - \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v_1^2}. \quad (4.6)$$

A k tomu je nutné použít kavitační parametr K_w , zjištěný při zkoušce se studenou vodou, ale snížený o opravný člen $\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v_1^2}$ [2].

Jelikož je vliv termodynamického kritéria B na proudové i termodynamické vlastnosti závislý na struktuře rozložení plynné fáze v kapalině (jestli obsahuje malé nebo velké bubliny apod.), jsou hodnoty Δp v tabulce 2.1 pouze informativní [2].

5. ÚČINKY KAVITACE

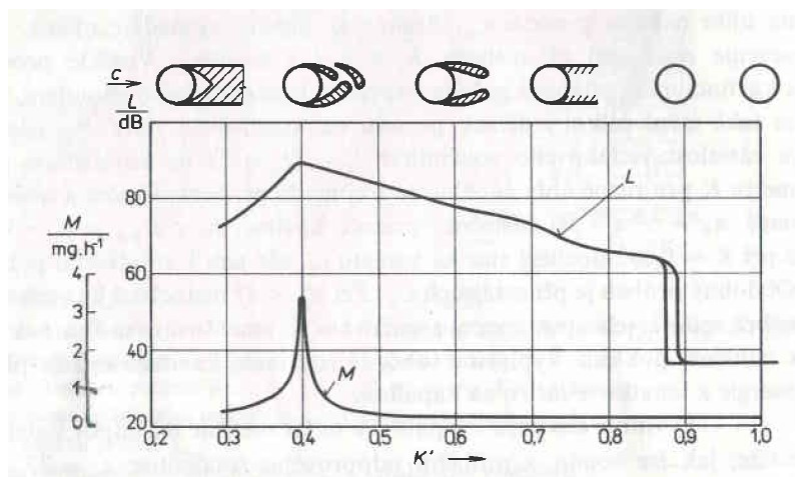
Kavitace ovlivňuje parametry proudění (Q , p , ztráty, apod.), způsobuje narušení ploch kavitační erozí, způsobuje vibrace zařízení a vyvolává kavitační šum a další doprovodné jevy [2].

5.1. OPOTŘEBENÍ MATERIÁLU

V závislosti na čase se povrch materiálu působením kavitace nejprve zdrsňuje, a následně se na něm začínou tvořit ostře ohraničené jamky. Dochází rovněž k odlamování materiálu z povrchové vrstvy, který je následně unášen proudem pryč. Tento proces je velmi rychlý, neboť se ho účastní velké množství bublin. Může dojít k odlomení části prvku součásti, nebo dokonce k havárii stroje [2].

Kavitační účinek se řadí mezi účinky škodlivé. Existují však případy, kdy se účinky kavitace mohou projevit i pozitivně. Je tomu tak například při čištění odlitků či rozrušování hornin [2].

Největší poškození součásti vzniká na konci kavitační oblasti ve směru proudění (v místech začátku zvyšování tlaku nad tlak kavitační). Dále po směru proudu, za oblastí snížení kavitační eroze, dochází k jejímu opětovnému zvýšení, tentokrát však s menší intenzitou. Tento jev lze vysvětlit opětovným růstem a zánikem kavitačních bublin [2].

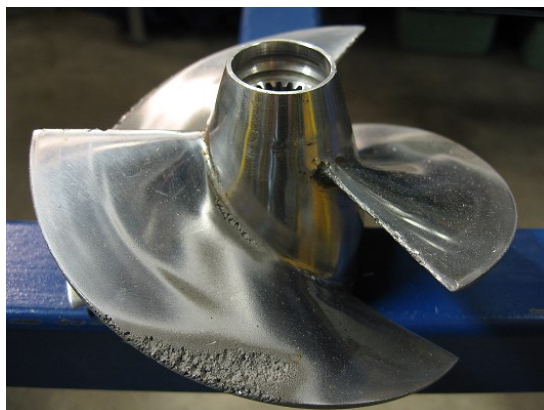


Obr. 5.1 – Kavitační opotřebení a kavitační šum při obtékání válečku při změně kavitačního parametru K [2]

Na intenzitu kavitační eroze působí stupeň vyvinutí kavitace. Kavitační eroze nejprve narůstá, dokud nedosáhne maxima, s dalším vývinem kavitace se následně zmenšuje, dokud nenabyde kritické hodnoty. Na Obr. 5.1 je vykreslena závislost mezi kavitačním opotřebením válečku a kavitačním parametrem K' , pro který platí vzorec

$$K' = \frac{2 \cdot p_2}{\rho \cdot v^2}, \quad (5.1)$$

kde p_2 je tlak za válečkem. V grafu jsou zaznačeny také hodnoty M (hmotnostní úbytek za hodinu) a L (hladina kavitačního hluku) [2].



Obr. 5.2 – Poškození povrchu lopatky vodního šroubu kavitační erozí [15]

Na Obr. 5.2 je vidět patrný vliv kavitační eroze na povrch lopatky vodního šroubu. Kavitace obecně poškozuje všechny druhy materiálu. Každý ale jiným způsobem. Kavitační opotřebení je totiž velmi komplikovaný jev [2],[15].

5.2. KAVITAČNÍ HLUK A VIBRACE

V kavitační oblasti se nachází velké množství kavitačních bublin, jejichž tlakové vlny se navzájem ovlivňují. Projevem je kavitační hluk L či kavitační šum. V praxi u hydraulických strojů se kavitační hluk projevuje převážně na ultrazvukové frekvenci. Čím jsou bubliny menší, tím vyšší frekvence dosahují (od 10 Hz pro velké bubliny až po 3 MHz pro malé bubliny). Tento úkaz je v praxi využíván pro detekci kavitace ve stroji [2].

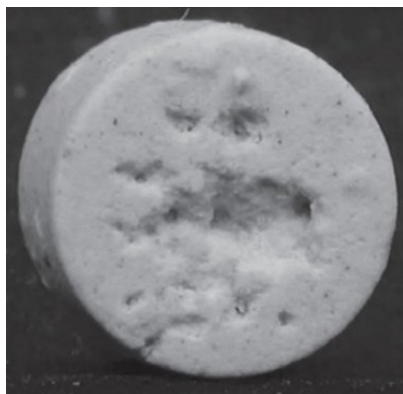
Kavitační hluk může dosahovat hodnot až 90 dB. Z Obr. 5.1 je zřejmé, že k maximálnímu hluku dojde ještě před plně vyvinutou kavitací. Je také vidět závislost mezi kavitačním opotřebením a kavitačním hlukem [2].

Kavitační jevy vyvolávají také vibrace (součástí i celých strojů). Jejich frekvence se pohybuje v rozmezí od 25 do 1 000 Hz. Pokud dojde ke shodě vlastní frekvence s frekvencí vibrací, může dojít jak k ulomení součástí, tak dokonce k havárii stroje. Stejně jako u kavitačního hluku i u vibrací existuje závislost mezi ní a kavitačním opotřebením [2].

6. VYUŽITÍ KAVITACE

Kavitace je nepopíratelně negativní jev, kterému je v běžné praxi třeba předejít. Navzdory tomu se však najdou odvětví, kde se její efekt může uplatnit. Je však důležité zmínit, že se ve většině případů jedná o kavitaci akustickou, nikoliv o kavitaci proudění.

- Bylo prokázáno, že ultrazvukovým ozařováním tavenin lze dosáhnout zjemnění zrnité struktury, vytvářet slitiny nemísitelných kovů, odplyňovat taveniny a urychlovat rozpuštění jednoho kovu v druhém. Účinky rostou se zvyšováním intenzity ultrazvuku v tavenině [3].
- Plech a trubky lze čistit tím, že se na krátkou dobu ponoří do čistící lázně, kde se okuje částečně uvolní, a následně se ponoří do další lázně, do vody, kde se okuje za pomoci kavitačních účinků ultrazvukového pole odbourávají [3].
- Vlivem kavitačního pole vznikají v kapalinách přetlaky a tahová napětí v mnoha MPa. Kapalina se vlivem toho roztrhává na nepatrné částčky. Tímto způsobem lze vytvořit i emulze, které nelze smísit (např. voda se rtutí). Nelze však vytvořit dokonalé emulze kapalin, které jsou ve vakuovém prostoru nebo v prostoru s velkým přetlakem plynů. V těchto případech je totiž kavitace potlačena. Pro vytváření emulzí používáme piezoelektrické, hydrodynamické a magnetostrikční generátory [3].
- Vlivem intenzivního ultrazvukového pole se rozptýlené částice pohybují ve vodě tak, že na sebe navzájem narážejí. Vzájemnými nárazy se třští a kavitací se ještě dále štěpí. Podle velikosti a druhu suspendovaných částic, jejichž rozměry hodláme zmenšit, volíme kmitočet ultrazvuku. Částice zásadně suspendujeme v kapalině o nízké viskozitě (např. voda). Tato metoda má význam v papírenském průmyslu (rozvláčňování vláken bučiny za pomoci generátorů) a v potravinářském průmyslu (extrakce aromatických látek) [3].
- V současnosti se kavitace využívá také v biomedicině. Jedním z nejběžnějších zákroků je odstranění ledvinových kamenů (litotrypse). Jedná se o terapii, kde vlivem akustických vln vysílaných na ledvinu dojde k rozpadu kamenu uvnitř ní. Pacient je během zákroku ponořen do lázně a akustické vlny jsou vysílány na postiženou část pacientova těla. Na Obr. 6.1 je vidět uměle vytvořený ledvinový kámen poškozený kavitací [4].

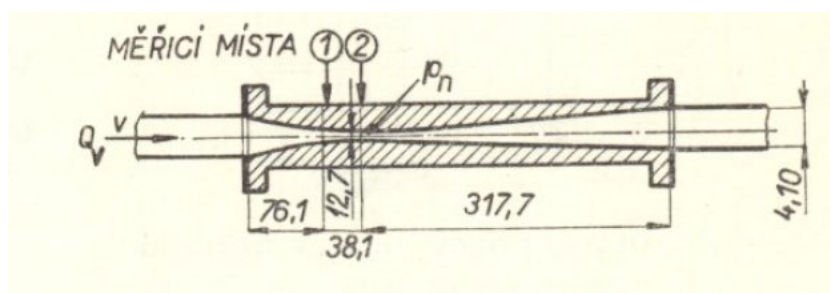


Obr. 6.1 – Poškozený ledvinový kámen vlivem kavitace [4]

7. KAVITACE V HYDRAULICKÝCH SYSTÉMECH

7.1. VENTURIHO TRUBICE

Venturiho trubice kruhového průřezu se řadí mezi nejjednodušší hydraulická zařízení sloužící ke zkoumání vývoje kavitace. Lze v ní pozorovat dva druhy kavitace. První druh vzniká u otvoru pro odběr tlaku (měřicí místo 1 na Obr. 7.1). Tato kavitační oblast je velmi malá a nemá vliv na průtok. Druhý typ kavitace, ke kterému dochází při snížení tlaku (v celém hydraulickém okruhu) či zvýšení průtoku, lze pozorovat v nejužším místě trubice (měřicí místo 2 na Obr. 7.1). Za tímto místem vzniká velká kavitační oblast, jež je neustálená a má vliv na průtok trubicí [1].

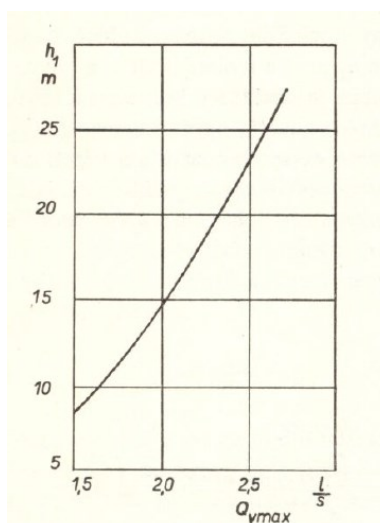


Obr. 7.1 – Princip proudění dýzou kruhového průměru [1]

Průtok Q_{vmax} , při kterém vzniká kavitace, je závislý tlakové výšce

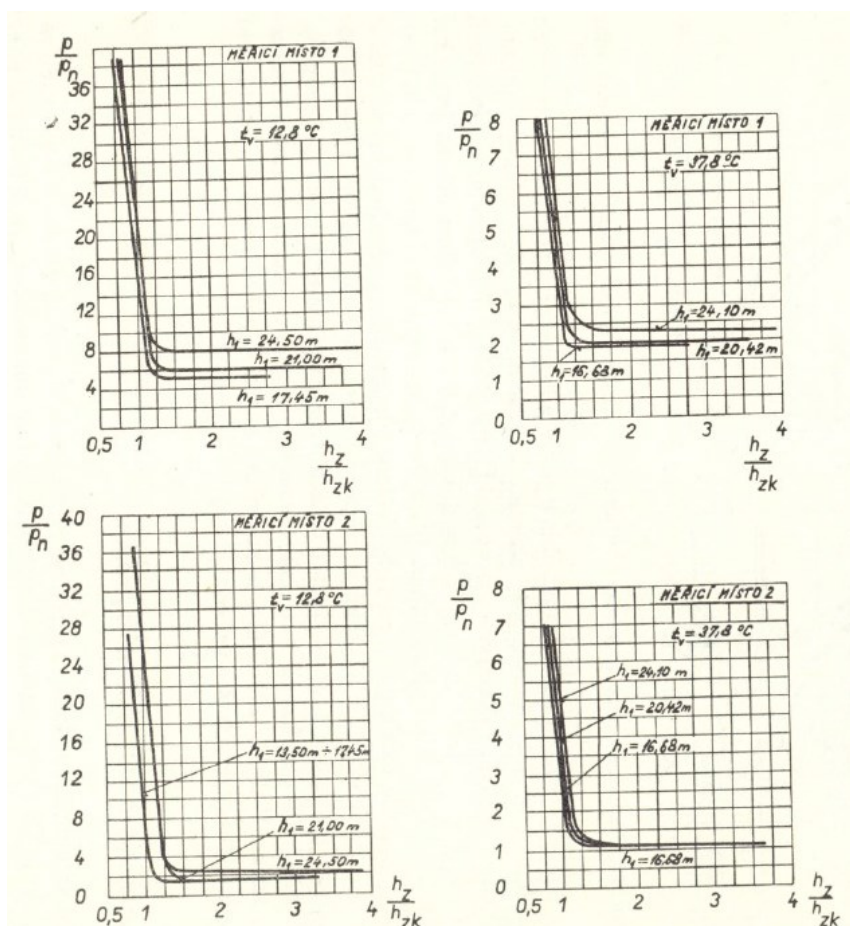
$$h_1 = \frac{p_1 - p_w}{g \cdot \rho}, \quad (7.1)$$

kde p_1 je tlak na vstupu, p_w je tlak nasycených par kapaliny, g je tíhové zrychlení a ρ je hustota kapaliny. Samotná závislost je vidět na Obr. 7.2 [1].



Obr. 7.2 – Graf závislosti maximálního průtoku trubicí na tlakové výšce [1]

Měření, které uskutečnili Daily a Johnson [16], prokázalo, že s rostoucí teplotou vody se charakter závislosti tlaku na tlakové výšce nemění, absolutní hodnota tlaku se však zvětšuje. Výsledky měření jsou na Obr. 7.3 [1].

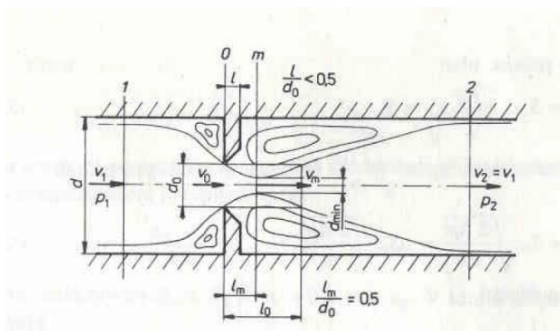


Obr. 7.3 – Závislost tlaku na tlakové výšce při různých teplotách [1]

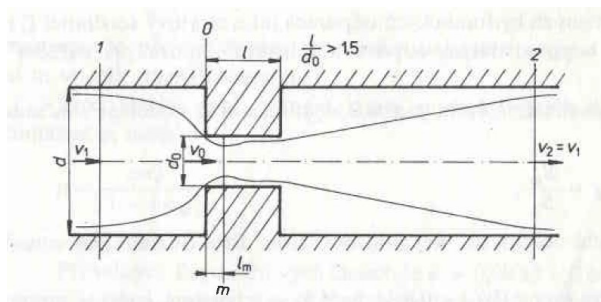
7.2. PRŮTOK ŠKRTICÍMI OTVORY

V praxi se využívají škrťací prvky různých tvarů, nejčastěji průřezu kruhového, trojúhelníkového, obdélníkového či mezikruhového. Kromě průměru škrťacího prvku je důležitým parametrem také jeho délka [2].

Na Obr. 7.4 je vyobrazeno proudění clonou (kruhový otvorem s poměrně krátkou délkou). Na vstupní hraně otvoru se proud odtrhává již při malých rychlostech a zúžení paprsku je největší ve vzdálenosti $l_m = 0,5 \cdot d_0$ za vstupní hranou, kde se dosahuje maximální střední rychlosti v_m . Je-li poměrná délka škrťacího otvoru $\frac{l}{d_0} < 0,5$, nemají stěny otvoru vliv na rozšíření proudu. Proudění otvorem s poměrnou délkou $\frac{l}{d_0} > 1,5$ je vyobrazeno na Obr. 7.5. [2]



Obr. 7.4 – Proudění clonou [2]



Obr. 7.5 – Proudění škrťicím otvorem kruhového průřezu [2]

Proudění kapaliny mezi průměry 1 a 2 je charakterizováno Bernoulliho rovnicí (za podmínky $v_1 = v_2$)

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + \xi \cdot \frac{v_1^2}{2}, \quad (7.2)$$

kde ξ je ztrátový součinitel vztažený na vstupní rychlost a e_r je celková měrná energie, která se vypočítá

$$e_r = \frac{\Delta p}{\rho} = \xi \cdot \frac{v_1^2}{2} [2]. \quad (7.3)$$

Odporový součinitel R vyjadřuje poměr mezi tlakovou ztrátou Δp a druhou mocninou průtoku Q^2 ,

$$R = \frac{\Delta p}{Q^2}, \quad (7.4)$$

a dá se využít k vyjádření ztrátového součinitele ξ

$$\xi = \frac{2 \cdot R \cdot S^2}{\rho} = \frac{\pi^2 \cdot \Delta p \cdot d^4}{8 \cdot \rho \cdot Q^2}, \quad (7.5)$$

kde d je průměr otvoru a ρ je hustota vody. Ze ztrátového součinitele jde vyjádřit výtokový součinitel

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi}}, \quad (7.6)$$

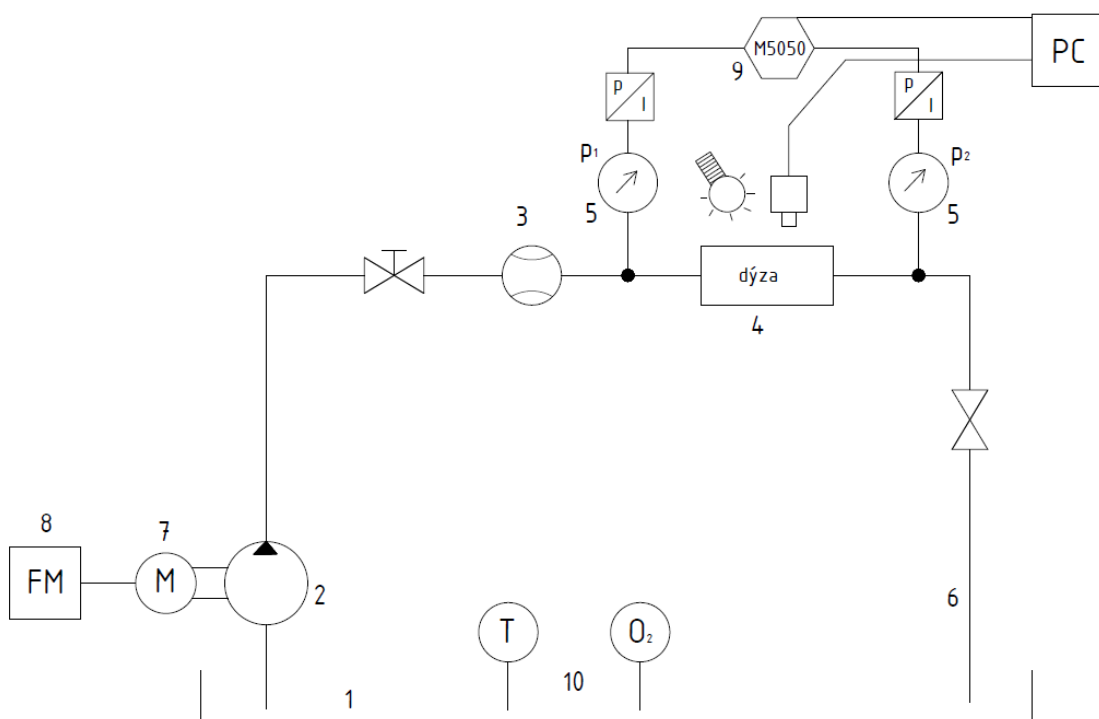
který závisí na stejných odporech jako ztrátový součinitel [2],[12].

8. NÁVRH MĚŘÍCIHO OBVODU

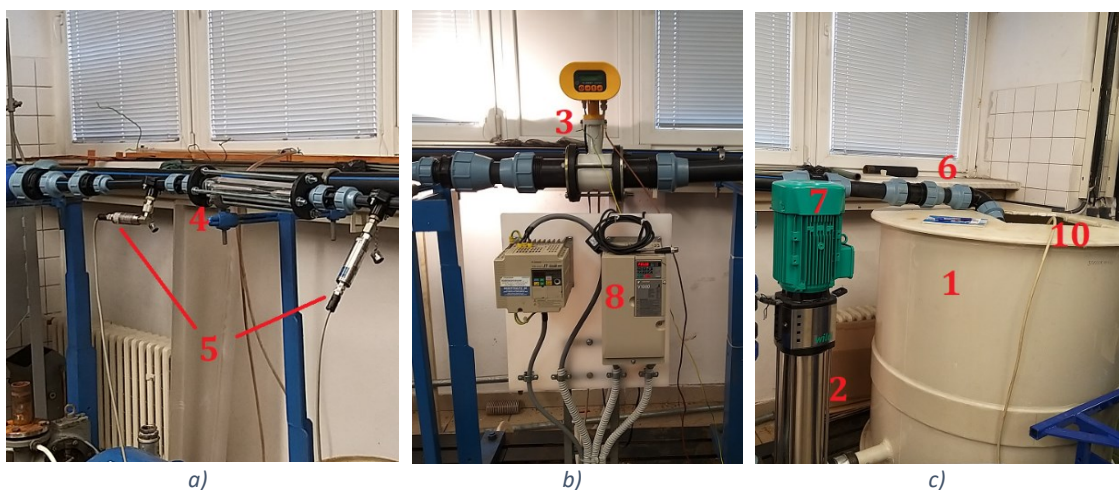
Měření bylo provedeno na dvou samostatných měřících obvodech, dále označované jako obvod A a obvod B, neboť bylo nutno dosáhnout velkého rozsahu průtoků, čehož nebylo možno na jedné trati dosáhnout.

8.1. POPIS MĚŘÍCIHO OBVODU A

Měřící obvod A, který je vyobrazen na Obr. 8.1 a Obr. 8.2, je navržen v souladu se zavedenými postupy a normou, a je umístěn na N108 v laboratoři katedry. Princip obvodu je založen na proudění vody, která je nasávána z nádrže (1) čerpadlem (2). Následně je voda vedena přes průtokoměr (3) do měřeného prvku – dýzy (4). Snímače tlaku (5) jsou umístěny dle normy před i za dýzou (4). Zpětným potrubím (6) je voda následně vedena zpět do nádrže (1). Otáčky čerpadla (2), které je poháněno elektromotorem (7), se nastavují pomocí frekvenčního měniče (8). Průtok odečítáme z průtokoměru (3) a tlaky z vyhodnocovacího zařízení (9). Zpětné potrubí (6) bylo do nádrže (1) zapuštěno pod hladinu, aby se minimalizovalo množství vzduchu, který by mohl ovlivnit kavitaci. Zároveň byl do nádrže (1) zapuštěn snímač teploty a kyslíku (10), který snímal množství rozpuštěného kyslíku a ve vodě a teplotu vody, která zůstala po dobu měření konstantní. Základní rozměry dýzy jsou na Obr. 8.3. Základní parametry důležitých prvků jsou uvedeny v Tab. 8.2.



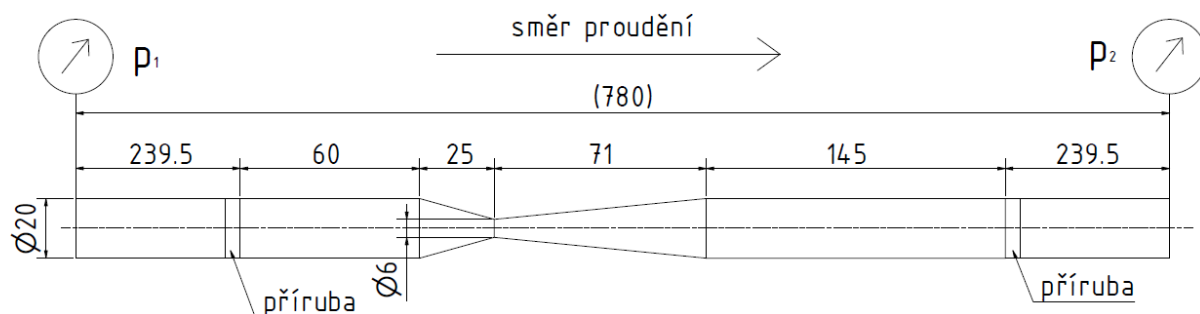
Obr. 8.1 – Schéma měřícího obvodu A



Obr. 8.2 – Měřicí obvod A



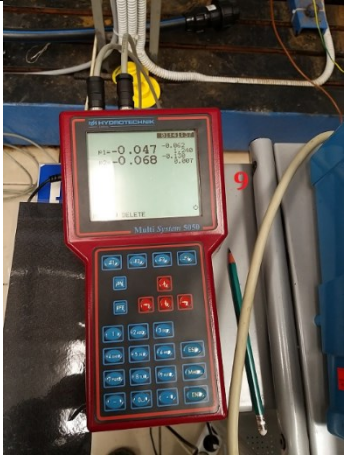
Tab. 8.1 Specifikace prvků v obvodu A


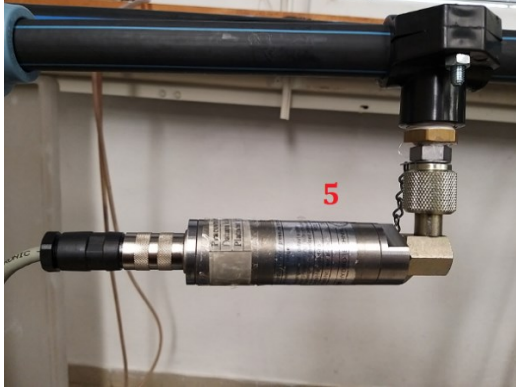
Prvek	Název prvku	Označení	Výrobce
1	Nádrž	50000014785	VŠB-TUO
2	Odstředivé čerpadlo	Helix V1605	WILO
3	Průtokoměr	FN2014PFEDN50	ELIS PLZEŇ
4	Dýza		
5	Snímače tlaku	3403-32-S-71.33A	HYDROTECHNIK
6	Potrubí		
7	Elektromotor	Q2E FC 112M2C	TEE
8	Frekvenční měnič	V1000 1/8 25HP	YASKAWA
9	Vyhodnocovací zařízení	M5050	HYDROTECHNIK
10	Měřidlo teploty a kyslíku	COM 223/253	EDNDRESS + HAUSER



Obr. 8.3 Rozměry měřeného prvku a připojení (v mm)

Tab. 8.2 – Tabulka prvků měřicího obvodu A

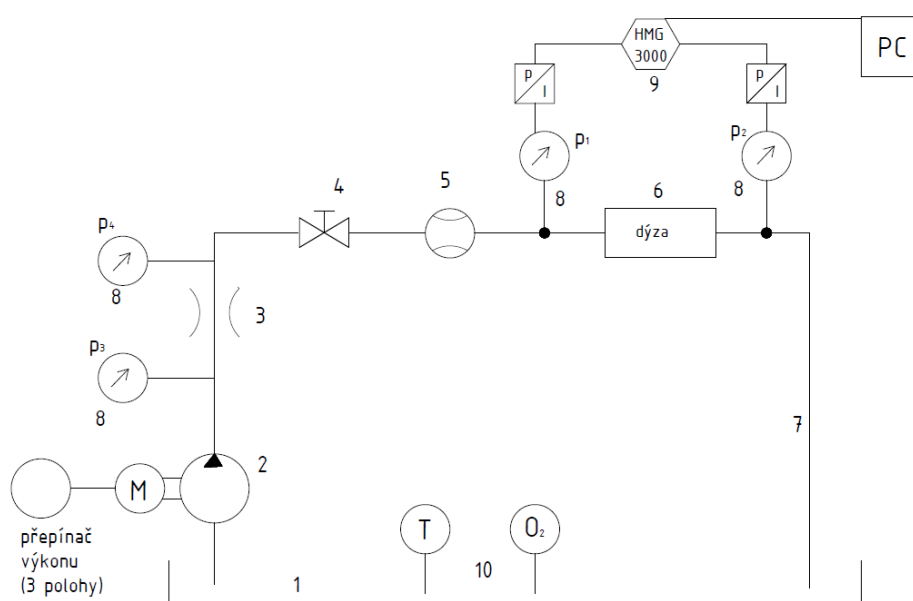
	<table border="1"> <tr> <td>Čerpadlo</td><td>Prvek č. 2</td></tr> <tr> <td>Výrobce</td><td>Wilo</td></tr> <tr> <td>Typ</td><td>Helix V1605</td></tr> <tr> <td>Jmenovitý průtok</td><td>16 m³·h⁻¹</td></tr> <tr> <td>Kmitočet</td><td>50/60 Hz</td></tr> </table>	Čerpadlo	Prvek č. 2	Výrobce	Wilo	Typ	Helix V1605	Jmenovitý průtok	16 m ³ ·h ⁻¹	Kmitočet	50/60 Hz	
Čerpadlo	Prvek č. 2											
Výrobce	Wilo											
Typ	Helix V1605											
Jmenovitý průtok	16 m ³ ·h ⁻¹											
Kmitočet	50/60 Hz											
	<table border="1"> <tr> <td>Průtokoměr</td><td>Prvek č. 3</td></tr> <tr> <td>Výrobce</td><td>Elis Plzeň a. s.</td></tr> <tr> <td>Typ</td><td>Indukční průtokoměr FLONET FN20XX.1</td></tr> <tr> <td>Jmenovitý průtok</td><td>Min/max = (0,72/72) m³·h⁻¹</td></tr> <tr> <td rowspan="2">Přesnost</td><td>± 0,2 % (pro 10-100 % Q_{max})</td></tr> <tr> <td>± 0,5 % (pro 5-100 % Q_{max})</td></tr> </table>	Průtokoměr	Prvek č. 3	Výrobce	Elis Plzeň a. s.	Typ	Indukční průtokoměr FLONET FN20XX.1	Jmenovitý průtok	Min/max = (0,72/72) m ³ ·h ⁻¹	Přesnost	± 0,2 % (pro 10-100 % Q _{max})	± 0,5 % (pro 5-100 % Q _{max})
Průtokoměr	Prvek č. 3											
Výrobce	Elis Plzeň a. s.											
Typ	Indukční průtokoměr FLONET FN20XX.1											
Jmenovitý průtok	Min/max = (0,72/72) m ³ ·h ⁻¹											
Přesnost	± 0,2 % (pro 10-100 % Q _{max})											
	± 0,5 % (pro 5-100 % Q _{max})											
	<table border="1"> <tr> <td>Vyhodnocovací zařízení M5050</td><td>Prvek č. 9</td></tr> <tr> <td>Výrobce</td><td>Hydrotechnik</td></tr> <tr> <td>Převodník</td><td>Multisystem 5050</td></tr> <tr> <td>Přesnost</td><td>± 0,02 %</td></tr> </table>	Vyhodnocovací zařízení M5050	Prvek č. 9	Výrobce	Hydrotechnik	Převodník	Multisystem 5050	Přesnost	± 0,02 %			
Vyhodnocovací zařízení M5050	Prvek č. 9											
Výrobce	Hydrotechnik											
Převodník	Multisystem 5050											
Přesnost	± 0,02 %											

	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Snímač tlaku na vstupu do dýzy</th><th>Prvek č. 5</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Výrobce</td><td>HYDROTECHNIK</td></tr> <tr> <td>Signál/odezva</td><td>4-20 mA / 1 ms</td></tr> <tr> <td>Přesnost</td><td>± 3 % (pro -20 až 80 °C)</td></tr> <tr> <td>Rozsah</td><td>(-1; 5) bar</td></tr> </tbody> </table>	Snímač tlaku na vstupu do dýzy	Prvek č. 5	Výrobce	HYDROTECHNIK	Signál/odezva	4-20 mA / 1 ms	Přesnost	± 3 % (pro -20 až 80 °C)	Rozsah	(-1; 5) bar
Snímač tlaku na vstupu do dýzy	Prvek č. 5										
Výrobce	HYDROTECHNIK										
Signál/odezva	4-20 mA / 1 ms										
Přesnost	± 3 % (pro -20 až 80 °C)										
Rozsah	(-1; 5) bar										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Snímač tlaku na výstupu z dýzy</th><th>Prvek č. 5</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Výrobce</td><td>HYDROTECHNIK</td></tr> <tr> <td>Signál/odezva</td><td>4-20 mA / 1 ms</td></tr> <tr> <td>Přesnost</td><td>± 3 % (pro -20 až 80 °C)</td></tr> <tr> <td>Rozsah</td><td>(-1; 1) bar</td></tr> </tbody> </table>	Snímač tlaku na výstupu z dýzy	Prvek č. 5	Výrobce	HYDROTECHNIK	Signál/odezva	4-20 mA / 1 ms	Přesnost	± 3 % (pro -20 až 80 °C)	Rozsah	(-1; 1) bar
Snímač tlaku na výstupu z dýzy	Prvek č. 5										
Výrobce	HYDROTECHNIK										
Signál/odezva	4-20 mA / 1 ms										
Přesnost	± 3 % (pro -20 až 80 °C)										
Rozsah	(-1; 1) bar										

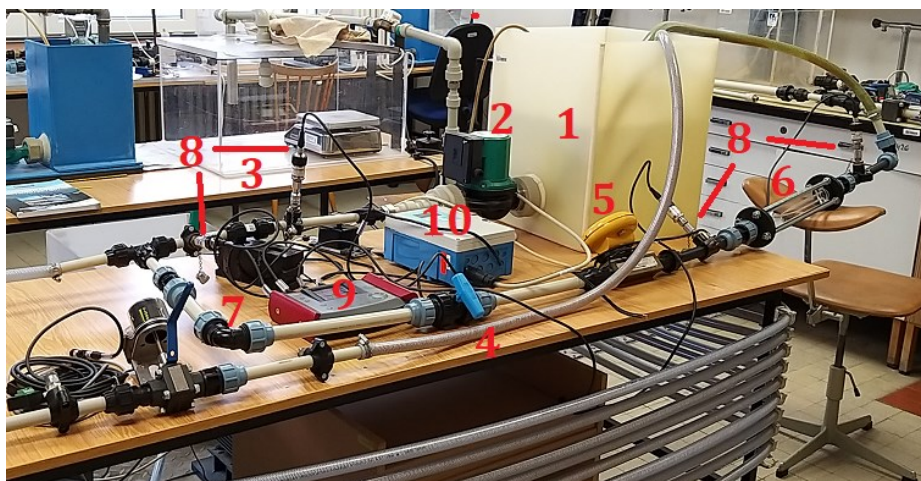
8.2. POPIS MĚŘICÍHO OBVODU B

Měřicí obvod B, který je na Obr. 8.4 a Obr. 8.5, je navržen v souladu s normou, a je umístěn na E306 v laboratoři katedry. Princip obvodu je založen na proudění vody, která je nasávána z nádrže (1) čerpadlem (2). Kapalina je následně vedena přes clonu (3). Před a za clonou jsou umístěny snímače tlaku (8). Následně je kapalina potrubím (7) vedena do kulového kohoutu (4), pomocí kterého regulujeme průtok, který následně snímáme průtokoměrem (5). Dále je v obvodu zařazen měřený prvek – dýza (6). Před a za dýzou jsou umístěny snímače tlaku (8). Následně je voda vedena zpět do nádrže (1). Základní parametry důležitých prvků jsou uvedeny v Tab. 8.4.

Čerpadlo (2) lze nastavit na hodnoty výkonu 390 W, 385 W a 335 W. Samotný průtok se ovšem ovlivňuje postupným uzavíráním kulového kohoutu (4). Průtok odečítáme z průtokoměru (5), tlaky na cloně (3) a na dýze (6) odečítáme na vyhodnocovacím zařízení (9). Oba snímače tlaků (8) na cloně a snímač před dýzou jsou v rozsahu (-1 až 5) bar, snímač za dýzou je v rozsahu (-1 až 1) bar. Zpětné potrubí bylo do nádrže (1) zapuštěno pod hladinu, aby se minimalizovalo množství vzduchu, který by mohl ovlivnit kavitaci. Zároveň byl do nádrže (1) zapuštěn snímač teploty a kyslíku (10), pro snímání množství rozpuštěného kyslíku a ve vodě a teplotu vody, která se vlivem práce v systému mírně zvyšovala.



Obr. 8.4 – Schéma měřicího obvodu B



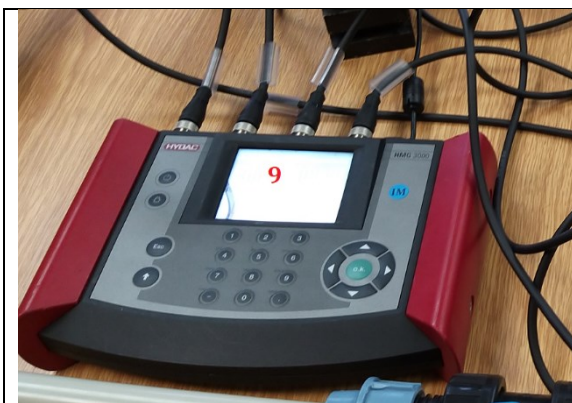
Obr. 8.5 – Měřicí obvod B

Tab. 8.3 – Specifikace prvků v obvodu B

Prvek	Název prvku	Označení	Výrobce
1	Nádrž		
2	Cirkulační čerpadlo	TOP-S30/20	WILO
3	Clona		
4	Kulový kohout		
5	Průtokoměr	Flomic FL 1014	ELIS PLZEŇ
6	Dýza		
7	Potrubi		
8	Snímače tlaku	3403-32-S-71.33A	HYDROTECHNIK
9	Vyhodnocovací zařízení	HMG 3000	HYDAC
10	Měřidlo teploty a kyslíku	COM 223/253	EDNDRESS + HAUSER

Tab. 8.4 – Tabulka prvků měřicího obvodu B

	<table border="1"> <tr> <th>Čerpadlo</th><th>Prvek č. 2</th></tr> <tr> <td>Výrobce</td><td>Wilo</td></tr> <tr> <td>Typ</td><td>TOP-S30/20</td></tr> <tr> <td>Jmenovitý výkon</td><td>335, 385, 390 W</td></tr> </table>	Čerpadlo	Prvek č. 2	Výrobce	Wilo	Typ	TOP-S30/20	Jmenovitý výkon	335, 385, 390 W		
Čerpadlo	Prvek č. 2										
Výrobce	Wilo										
Typ	TOP-S30/20										
Jmenovitý výkon	335, 385, 390 W										
	<table border="1"> <tr> <th>Průtokoměr</th><th>Prvek č. 5</th></tr> <tr> <td>Výrobce</td><td>Elis Plzeň a. s.</td></tr> <tr> <td>Typ</td><td>Ultrazvukový průtokoměr FLOMIC FL 1014</td></tr> <tr> <td>Jmenovitý průtok</td><td>Min/max = (0/3) m³·h⁻¹</td></tr> <tr> <td>Přesnost</td><td>± 0,5 %</td></tr> </table>	Průtokoměr	Prvek č. 5	Výrobce	Elis Plzeň a. s.	Typ	Ultrazvukový průtokoměr FLOMIC FL 1014	Jmenovitý průtok	Min/max = (0/3) m ³ ·h ⁻¹	Přesnost	± 0,5 %
Průtokoměr	Prvek č. 5										
Výrobce	Elis Plzeň a. s.										
Typ	Ultrazvukový průtokoměr FLOMIC FL 1014										
Jmenovitý průtok	Min/max = (0/3) m ³ ·h ⁻¹										
Přesnost	± 0,5 %										
	<table border="1"> <tr> <th>Snímače tlaku na cloně a vstupu do dýzy</th><th>Prvek č. 8</th></tr> <tr> <td>Výrobce</td><td>HYDROTECHNIK</td></tr> <tr> <td>Signál/odezva</td><td>4-20 mA / 1 ms</td></tr> <tr> <td>Rozsah</td><td>(-1; 5) bar</td></tr> <tr> <td>Přesnost</td><td>± 3 % (pro -20 až 80 °C)</td></tr> </table>	Snímače tlaku na cloně a vstupu do dýzy	Prvek č. 8	Výrobce	HYDROTECHNIK	Signál/odezva	4-20 mA / 1 ms	Rozsah	(-1; 5) bar	Přesnost	± 3 % (pro -20 až 80 °C)
Snímače tlaku na cloně a vstupu do dýzy	Prvek č. 8										
Výrobce	HYDROTECHNIK										
Signál/odezva	4-20 mA / 1 ms										
Rozsah	(-1; 5) bar										
Přesnost	± 3 % (pro -20 až 80 °C)										
	<table border="1"> <tr> <th>Snímač tlaku na výstupu z dýzy</th><th>Prvek č. 8</th></tr> <tr> <td>Výrobce</td><td>HYDROTECHNIK</td></tr> <tr> <td>Signál/odezva</td><td>4-20 mA / 1 ms</td></tr> <tr> <td>Rozsah</td><td>(-1; 1) bar</td></tr> <tr> <td>Přesnost</td><td>± 3 % (pro -20 až 80 °C)</td></tr> </table>	Snímač tlaku na výstupu z dýzy	Prvek č. 8	Výrobce	HYDROTECHNIK	Signál/odezva	4-20 mA / 1 ms	Rozsah	(-1; 1) bar	Přesnost	± 3 % (pro -20 až 80 °C)
Snímač tlaku na výstupu z dýzy	Prvek č. 8										
Výrobce	HYDROTECHNIK										
Signál/odezva	4-20 mA / 1 ms										
Rozsah	(-1; 1) bar										
Přesnost	± 3 % (pro -20 až 80 °C)										



Vyhodnocovací zařízení M5050	Prvek č. 9
Výrobce	Hydac
Převodník	HMG 3000

9. MĚŘENÍ HYDRAULICKÝCH VELIČIN A JEJICH VYHODNOCENÍ

Cílem měření bylo získat hodnoty tlaků před a za dýzou, průtoky, teploty a obsahy vzduchu pro matematickou simulaci vzniku a vývoje kavitace při průtoku vody konvergentní divergentní dýzou kruhového průřezu.

Princip měření je v obou obvodech stejný, jelikož ale obvody nejsou identické, postupy jednotlivých měření se liší.

9.1. POSTUP MĚŘENÍ NA OBVODU A

Do sestaveného měřicího obvodu jsem připojil snímače tlaků. Všechny tlakoměry bylo nutné připojit, nadefinovat a vynulovat ve vyhodnocovacím zařízení Hydrotechnik M5050. Snímač tlaku před dýzou měřil tlak v rozsahu (-1; 5) bar, snímač tlaku za dýzou v rozsahu (-1; 1) bar. Do nádrže jsem poté zapustil snímač teploty a kyslíku.

Průtok v obvodu se nastavil za pomoci frekvenčního měniče. Jakmile se proudění kapaliny ustálilo, započal jsem s odečítáním hodnot. Tlaky jsem odečítal z vyhodnocovacího zařízení Hydrotechnik M5050, průtok z indukčního průtokoměru umístěného před dýzou a teplotu a obsah kyslíku v nádrži ze snímače COM 223/253. Následně jsem vytvořil záznam tlaků a průtoků po dobu 5 s s frekvencí ukládání 1 ms. Poznačil jsem si, zda vznikala kavitace, a pro vybrané měření, za kterých vznikala, jsem pořídil videozáznam vysokorychlostní kamerou.

Měření jsem zahájil nastavením frekvenčního měniče na otáčky 7 Hz. Celý postup jsem následně opakoval až do hodnoty 18 Hz při zvyšování otáček o 1 Hz. V Tab. 9.1 jsem uvedl zprůměrované hodnoty tlaků a průtoku zjištěné ze záznamu.

Tab. 9.1 – Tabulka naměřených hodnot na obvodu A

f [Hz]	p_1 [bar]	p_2 [bar]	Q [m ³ ·h ⁻¹]	O ₂ /H ₂ O [mg·l ⁻¹]	t [°C]	kavitace [1]	záznam [1]
7	0,117	-0,04	1,557	8,49	19,4	ano	ne
8	0,172	-0,025	1,725	8,47	19,4	ano	ano
9	0,241	-0,019	1,828	8,45	19,5	ano	ano
10	0,317	-0,014	1,965	8,45	19,5	ano	ano
11	0,402	-0,013	2,066	8,44	19,5	ano	ne
12	0,494	-0,019	2,135	8,38	19,5	ano	ano
13	0,594	-0,019	2,215	8,37	19,5	ano	ne
14	0,702	-0,024	2,378	8,36	19,5	ano	ano
15	0,818	-0,026	2,462	8,34	19,5	ano	ne
16	0,941	-0,026	2,544	8,32	19,5	ano	ano
17	1,074	-0,031	2,702	8,36	19,5	ano	ne
18	1,213	-0,035	2,742	8,33	19,6	ano	ano

9.2. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO OBVOD A

Cílem tohoto vyhodnocování bylo určit hodnotu **kavitačního čísla K** , **Reynoldsova čísla Re** , **objemového zlomku vzduchu α** a **hmotnostního zlomku vzduchu Y** .

Nejprve bylo nutné určit tlakovou ztrátu Δp . Tu jsem vypočetl jako rozdíl tlaků před dýzou p_1 a za dýzou p_2 . Rovněž bylo nutné převést hodnoty průtoku Q na základní jednotky.

$$\Delta p = |p_1 - p_2| = 100\,000 \cdot |0,117 + 0,04| = 15\,700 \text{ Pa}$$

$$Q = \frac{1,557}{3\,600} = 4,33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Dále jsem vypočítal rychlosti v obou průměrech dýzy, kde $D_1 = 6 \text{ mm}$ je nejužší průměr dýzy a $D_2 = 20 \text{ mm}$ je vstupní průměr na dýze.

$$v_{D1} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4 \cdot 4,33 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,006^2} = 15,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{D2} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_2^2} = \frac{4 \cdot 4,33 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,02^2} = 1,38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Určil jsem Reynoldsova čísla pro oba průměry. Pro teplotu vody přibližně 20 °C jsem zvolil kinematickou viskozitu $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [9].

$$Re_{D1} = \frac{v_{D1} \cdot D_1}{\nu} = \frac{15,30 \cdot 0,006}{10^{-6}} = 91\,779$$

$$Re_{D2} = \frac{v_{D2} \cdot D_2}{\nu} = \frac{1,38 \cdot 0,02}{10^{-6}} = 27\,534$$

Také jsem na výstupu z dýzy vypočítal kavitační číslo K . Nejprve bylo ale nutné vypočítat absolutní hodnotu tlaku p_2 . Pro výpočet kavitačního čísla také potřebuji znát hodnotu tlaku nasycených par a hustotu kapaliny. Pro teplotu, za které se měřilo (cca. 20 °C), nabývají hodnot $p_w = 2\,337\text{ Pa}$ a $\rho = 998\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [9]. Měření bylo prováděno 4.2.2021 v Ostravě. Hodnota atmosférického tlaku ten den odpovídala $p_b = 100\,900\text{ Pa}$ [7].

$$p_{2abs} = p_b + p_2 = 100\,900 - 0,04 \cdot 100\,000 = 96\,900\text{ Pa}$$

$$K = \frac{2 \cdot (p_{2abs} - p_w)}{\rho \cdot v_{D1}^2} = \frac{2 \cdot (96\,900 - 2\,337)}{998 \cdot 15,3^2} = 0,8099$$

Jelikož se kavitace projevila při všech hodnotách průtoku, **nelze** počítat ztrátu ξ a výtokový součinitel μ .

Pro výpočet množství vzduchu je nejprve třeba převést teplotu na termodynamickou teplotu.

$$T = t + 273,15 = 19,4 + 273,15 = 292,55\text{ K}$$

Ze znalosti stavové rovnice jsem vypočítal hustotu a objemový zlomek kyslíku a dusíku. Potřebuji však znát jejich molární hmotnost. Molární hmotnost kyslíku O_2 je $32\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ a dusíku N_2 je $28,02\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ [10]. Univerzální plynová konstanta je $R = 8,314\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ a atmosférický tlak $p_b = 100\,900\text{ Pa}$ [7]. Z těchto hodnot jsem určil rovnici pro hustotu kyslíku.

$$\rho_{O2} = \frac{p_b \cdot M_{O2}}{R \cdot T} = \frac{100\,900 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 292,55} = 1,3275\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Z naměřených hodnot obsahu kyslíku jsem nyní definoval objemový zlomek kyslíku α_{O2} . Objemový zlomek dusíku α_{N2} vypočtu pomocí znalosti složení vzduchu. Vzduch obsahuje přibližně 79 % dusíku a 21 % kyslíku. Pomocí tohoto poměru jsem vyjádřil z α_{O2} α_{N2} .

$$\alpha_{O2} = \frac{O_2}{\rho_{O2}} = \frac{8,49 \cdot 10^{-3}}{1,3275} = 0,0064$$

$$\alpha_{N_2} = \alpha_{O_2} \cdot \frac{79}{21} = 0,0064 \cdot \frac{79}{21} = 0,0241$$

Součtem obou objemových zlomků získáme celkový objemový zlomek v nádrži. Ten následně vyjádřím také v procentech.

$$\alpha_{nádrž} = \alpha_{O_2} + \alpha_{N_2} = 0,0064 + 0,0241 = 0,0305$$

$$\alpha_{nádrž} = 0,0305 \cdot 100 \% = 3,05 \%$$

Také určím hmotnostní zlomek vzduchu Y . Nejprve musím vypočítat hustotu vzduchu v závislosti na tlaku a teplotě. K tomu využiji stavovou rovnici. Molární hmotnost vzduchu je $28,96 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

$$\rho_{vzduch} = \frac{p_b \cdot M_{vzduch}}{R \cdot T} = \frac{100\,900 \cdot 28,96 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 292,55} = 1,2014 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$Y = \frac{\rho_{vzduch} \cdot \alpha_{nádrž}}{\rho_{vzduch} \cdot \alpha_{nádrž} + \rho \cdot (1 - \alpha_{nádrž})} = \frac{1,2014 \cdot 0,0305}{1,2014 \cdot 0,0305 + 998 \cdot (1 - 0,0305)}$$

$$Y = 3,78 \cdot 10^{-5}$$

Z Tab. 9.2 je patrné, že při všech měřeních byl na vstupu z dýzy podtlak, proto bylo důležité mít v nádrži umístěný konec potrubí pod hladinou. Pokud by tomu tak nebylo, vznikalo by zpětné proudění vzduchu. Reynoldsovo číslo na vstupu i v nejužším průřezu bylo větší než kritická hodnota pro kruhový průřez potrubí (2 320), a proto lze usoudit, že je v systému turbulentní proudění.

Z Tab. 9.3 je patrné, že objemový zlomek vzduchu v nádrži je kolem 3 %. Hustota vzduchu se v nádrži vlivem téměř konstantní teploty nemění a má hodnotu $\rho_{vzduchu} = 998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Tab. 9.2 – Tabulka vypočtených hodnot pro obvod A

Δp	Q	v_{D1}	v_{D2}	p_2	p_{2abs}	K	Re_{D1}	Re_{D2}
[Pa]	[m ³ ·s ⁻¹]	[m·s ⁻¹]	[m·s ⁻¹]	[Pa]	[Pa]	[1]	[1]	[1]
15 700	4,33E-04	15,30	1,38	-4 000	96 900	0,8099	91 779	27 534
19 700	4,79E-04	16,95	1,53	-2 500	98 400	0,6703	101 682	30 505
26 000	5,08E-04	17,96	1,62	-1 900	99 000	0,6006	107 754	32 326
33 100	5,46E-04	19,30	1,74	-1 400	99 500	0,5225	115 829	34 749
41 500	5,74E-04	20,30	1,83	-1 300	99 600	0,4731	121 783	36 535
51 300	5,93E-04	20,98	1,89	-1 900	99 000	0,4403	125 850	37 755
61 300	6,15E-04	21,76	1,96	-1 900	99 000	0,4091	130 566	39 170
72 600	6,61E-04	23,36	2,10	-2 400	98 500	0,3531	140 174	42 052
84 400	6,84E-04	24,19	2,18	-2 600	98 300	0,3287	145 126	43 538
96 700	7,07E-04	24,99	2,25	-2 600	98 300	0,3079	149 959	44 988
110 500	7,51E-04	26,55	2,39	-3 100	97 800	0,2715	159 273	47 782
124 800	7,62E-04	26,94	2,42	-3 500	97 400	0,2625	161 631	48 489

Tab. 9.3 – Tabulka vypočtených hodnot pro obvod A

T	ρ_{O_2}	α_{O_2}	α_{N_2}	$\alpha_{nádrž}$		ρ_{vzduch}	Y
[K]	[kg·m ⁻³]	[1]	[1]	[1]	[%]	[kg·m ⁻³]	[1]
292,55	1,3275	0,0064	0,0241	0,0305	3,05	1,2014	3,78E-05
292,55	1,3275	0,0064	0,0240	0,0304	3,04	1,2014	3,77E-05
292,65	1,3270	0,0064	0,0240	0,0303	3,03	1,2010	3,76E-05
292,65	1,3270	0,0064	0,0240	0,0303	3,03	1,2010	3,76E-05
292,65	1,3270	0,0064	0,0239	0,0303	3,03	1,2010	3,76E-05
292,65	1,3270	0,0063	0,0238	0,0301	3,01	1,2010	3,73E-05
292,65	1,3270	0,0063	0,0237	0,0300	3,00	1,2010	3,73E-05
292,65	1,3270	0,0063	0,0237	0,0300	3,00	1,2010	3,72E-05
292,65	1,3270	0,0063	0,0236	0,0299	2,99	1,2010	3,71E-05
292,65	1,3270	0,0063	0,0236	0,0299	2,99	1,2010	3,70E-05
292,65	1,3270	0,0063	0,0237	0,0300	3,00	1,2010	3,72E-05
292,75	1,3266	0,0063	0,0236	0,0299	2,99	1,2006	3,71E-05

9.3. POSTUP MĚŘENÍ NA OBVODU B

Připojil jsem snímače tlaku do měřícího zařízení Hydac HMG 3000 a nadefinoval a vynuloval je. Snímače tlaku na cloně a před dýzou měřily absolutní tlak v rozsahu (-1; 5) bar, snímač tlaku za dýzou v rozsahu (-1; 1) bar. Do nádrže jsem umístil snímač teploty a kyslíku.

Následně jsem naplno otevřel kulový kohout před dýzou a poté jsem spustil čerpadlo. Po ustálení proudění jsem začal s odečítáním měřených hodnot. Tlaky jsem odečítal z vyhodnocovacího zařízení Hydac HMG 3000, průtok z průtokoměru a teplotu a obsah

kyslíku v nádrži ze snímače COM 223/253. Také jsem vytvořil záznam tlaků po dobu 10 s s frekvencí ukládání 1 ms. Poté jsem mírně uzavřel kulový kohout a zapsal další hodnoty. Celý postup jsem opakoval, dokud nebyl kulový kohout zcela uzavřen, tedy, dokud nebyl průtok v obvodu nulový.

Jelikož bylo možné nastavit otáčky čerpadla na 3 různé hodnoty výkonu, rozhodl jsem se celý postup provést pro všechny možnosti. Nejprve jsem provedl měření pro výkon 390 W, následně pro výkon 385 W a nakonec pro výkon 335 W. Naměřené hodnoty jsem zapisoval ručně. Výjimkou byly hodnoty tlaků pro výkon 385 W, které jsem zaznamenal pomocí vyhodnocovacího zařízení HMG 3000. Pro každou hodnotu průtoku jsem pořídil 10 000 hodnot tlaků a následně jsem z nich vypočetl průměrné hodnoty. Naměřené hodnoty pro výkon 390 W jsou uvedeny v Tab. 9.4, pro výkon 385 W v Tab. 9.5 a pro výkon 335 W v Tab. 9.6.

Tab. 9.4 – Naměřené hodnoty na obvodu B pro výkon 390 W

p_1 [bar]	p_2 [bar]	Q [m ³ ·h ⁻¹]	O_2/H_2O [mg·l ⁻¹]	t [°C]	kavitace [1]
0,39	0,05	1,73	7,61	22,8	ano
0,33	0,05	1,68	7,56	23	ano
0,29	0,05	1,65	7,55	23	ano
0,21	0,05	1,52	7,53	23,1	ne
0,13	0,03	1,05	7,53	23,2	ne
0,04	0,02	0,2	7,45	23,2	ne
0,03	0,02	0	7,45	23,2	ne

Tab. 9.5 – Naměřené hodnoty na obvodu B pro výkon 385 W

p_1 [bar]	p_2 [bar]	Q [m ³ ·h ⁻¹]	O_2/H_2O [mg·l ⁻¹]	t [°C]	kavitace [1]
0,37	0,05	1,71	7,5	23,5	ano
0,33	0,05	1,68	7,51	23,6	ano
0,24	0,05	1,62	7,54	23,7	ano
0,20	0,05	1,53	7,46	23,8	ne
0,12	0,03	1,05	7,44	23,8	ne
0,07	0,02	0,68	7,39	23,9	ne
0,04	0,02	0,24	7,36	23,9	ne
0,03	0,02	0,06	7,35	24	ne
0,03	0,02	0	7,33	24	ne

Tab. 9.6 – Naměřené hodnoty na obvodu B pro výkon 335 W

p_1 [bar]	p_2 [bar]	Q [m ³ ·h ⁻¹]	O ₂ /H ₂ O [mg·l ⁻¹]	t [°C]	kavitace [1]
0,30	0,05	1,66	7,48	24,1	ano
0,22	0,05	1,63	7,46	24,3	ano
0,19	0,04	1,45	7,39	24,3	ne
0,15	0,03	1,25	7,35	24,4	ne
0,11	0,02	0,96	7,3	24,5	ne
0,07	0,02	0,65	7,26	24,5	ne
0,05	0,02	0,43	7,25	24,5	ne
0,03	0,02	0,16	7,23	24,5	ne
0,03	0,02	0	7,23	24,5	ne

9.4. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO OBVOD B

Pro následující rozbor jsem využil data naměřená při výkonu **390 W**. Postup je však shodný i pro výkony 385 W a 335 W.

Cílem tohoto vyhodnocování bylo určit hodnotu **kavitačního čísla K** , **Reynoldsova čísla Re** , **ztrátu ξ** , **výtokový součinitel μ** , **objemový zlomek vzduchu α** a **hmotnostní zlomek vzduchu Y** .

Výpočet tlakové ztráty Δp , průtoku Q , rychlosti v , kavitačního čísla K a Reynoldsových čísel Re je shodný s výpočty pro obvod A. Z toho důvodu nebudu postup znova uvádět. Měření bylo prováděno 8.4.2021 v Ostravě. Hodnota atmosférického tlaku ten den odpovídala $p_b = 101\,600\text{ Pa}$ [8].

Jelikož se při měření na této trati kavitace projevila pouze při vyšších hodnotách průtoku, mohu počítat hodnotu ztráty ξ a výtokového součinitele μ .

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v_{D2}^2} = \frac{2 \cdot 34\,000}{998 \cdot 1,53^2} = 29,1$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi}} = \frac{1}{\sqrt{29,1}} = 0,1853$$

Výpočet objemového a hmotnostního zlomku bude opět identický s výpočtem pro obvod A. Opět tedy nebudu postup uvádět.

V Tab. 9.7, Tab. 9.8 a Tab. 9.9 Tab. 9.2 jsou uvedeny všechny vypočítané hodnoty v závislosti na výkonu čerpadla.

Tab. 9.7 – Tabulka vypočtených hodnot pro obvod B při výkonu 390 W

Δp [Pa]	Q [m ³ ·s ⁻¹]	v_{D1} [m·s ⁻¹]	v_{D2} [m·s ⁻¹]	p_2 [Pa]	p_{2abs} [Pa]	K [1]	ξ [1]	μ [1]
34 000	4,81E-04	17,00	1,53	5 000	106 600	0,7233	29,1	0,1853
28 000	4,67E-04	16,50	1,49	5 000	106 600	0,7670	25,4	0,1983
24 000	4,58E-04	16,21	1,46	5 000	106 600	0,7952	22,6	0,2104
16 000	4,22E-04	14,93	1,34	5 000	106 600	0,9370	17,8	0,2373
10 000	2,92E-04	10,32	0,93	3 000	104 600	1,9259	23,3	0,2074
2 000	5,56E-05	1,96	0,18	2 000	103 600	52,5630	128,2	0,0883
1 000	0	0	0	2 000	103 600	-	-	-

Re_{D1}	Re_{D2}	T	ρ_{O2}	$\alpha_{O2vstup}$	$\alpha_{N2vstup}$	$\alpha_{objemový-nádrž}$		ρ_{vzduch}	Y
[1]	[1]	[K]	[kg·m ⁻³]	[1]	[1]	[1]	[%]	[kg·m ⁻³]	[1]
101 977	30 593	295,95	1,3213	0,0058	0,0217	0,0274	2,74	1,1958	3,38E-05
99 030	29 709	296,15	1,3204	0,0057	0,0215	0,0273	2,73	1,1950	3,36E-05
97 261	29 178	296,15	1,3204	0,0057	0,0215	0,0272	2,72	1,1950	3,35E-05
89 598	26 880	296,25	1,3200	0,0057	0,0215	0,0272	2,72	1,1946	3,34E-05
61 894	18 568	296,35	1,3196	0,0057	0,0215	0,0272	2,72	1,1942	3,34E-05
11 789	3 537	296,35	1,3196	0,0056	0,0212	0,0269	2,69	1,1942	3,31E-05
0	0	296,35	1,3196	0,0056	0,0212	0,0269	2,69	1,1942	3,31E-05

Tab. 9.8 – Tabulka vypočtených hodnot pro obvod B při výkonu 385 W

Δp [Pa]	Q [m ³ ·s ⁻¹]	v_{D1} [m·s ⁻¹]	v_{D2} [m·s ⁻¹]	p_2 [Pa]	p_{2abs} [Pa]	K [1]	ξ [1]	μ [1]
31 996	4,75E-04	16,80	1,51	5 170	106 770	0,742	28,0	0,1888
27 673	4,67E-04	16,50	1,49	4 999	106 599	0,767	25,1	0,1995
19 203	4,50E-04	15,92	1,43	4 890	106 490	0,824	18,8	0,2309
15 678	4,25E-04	15,03	1,35	4 555	106 155	0,921	17,2	0,2413
9 081	2,92E-04	10,32	0,93	3 194	104 794	1,930	21,1	0,2176
4 784	1,89E-04	6,68	0,60	2 480	104 080	4,569	26,5	0,1942
1 882	6,67E-05	2,36	0,21	2 012	103 612	36,506	83,7	0,1093
1 002	1,67E-05	0,59	0,05	1 917	103 517	583,556	713,2	0,0374
862	0	0	0	1 915	103 515	-	-	-

Re_{D1}	Re_{D2}	T	ρ_{O_2}	$\alpha_{O_2 \text{vstup}}$	$\alpha_{N_2 \text{vstup}}$	$\alpha_{\text{objemový-nádrž}}$		ρ_{vzduch}	Y
[1]	[1]	[K]	[kg·m ⁻³]	[1]	[1]	[1]	[%]	[kg·m ⁻³]	[1]
100 798	30 239	296,65	1,3182	0,0057	0,0214	0,0271	2,71	1,1930	3,33E-05
99 030	29 709	296,75	1,3178	0,0057	0,0214	0,0271	2,71	1,1926	3,33E-05
95 493	28 648	296,85	1,3173	0,0057	0,0215	0,0273	2,73	1,1922	3,35E-05
90 188	27 056	296,95	1,3169	0,0057	0,0213	0,0270	2,70	1,1918	3,31E-05
61 894	18 568	296,95	1,3169	0,0056	0,0213	0,0269	2,69	1,1918	3,3E-05
40 083	12 025	297,05	1,3164	0,0056	0,0211	0,0267	2,67	1,1914	3,28E-05
14 147	4 244	297,05	1,3164	0,0056	0,0210	0,0266	2,66	1,1914	3,26E-05
3 537	1 061	297,15	1,3160	0,0056	0,0210	0,0266	2,66	1,1910	3,26E-05
0	0	297,15	1,3160	0,0056	0,0210	0,0265	2,65	1,1910	3,25E-05

Tab. 9.9 – Tabulka vypočtených hodnot pro obvod B při výkonu 335 W

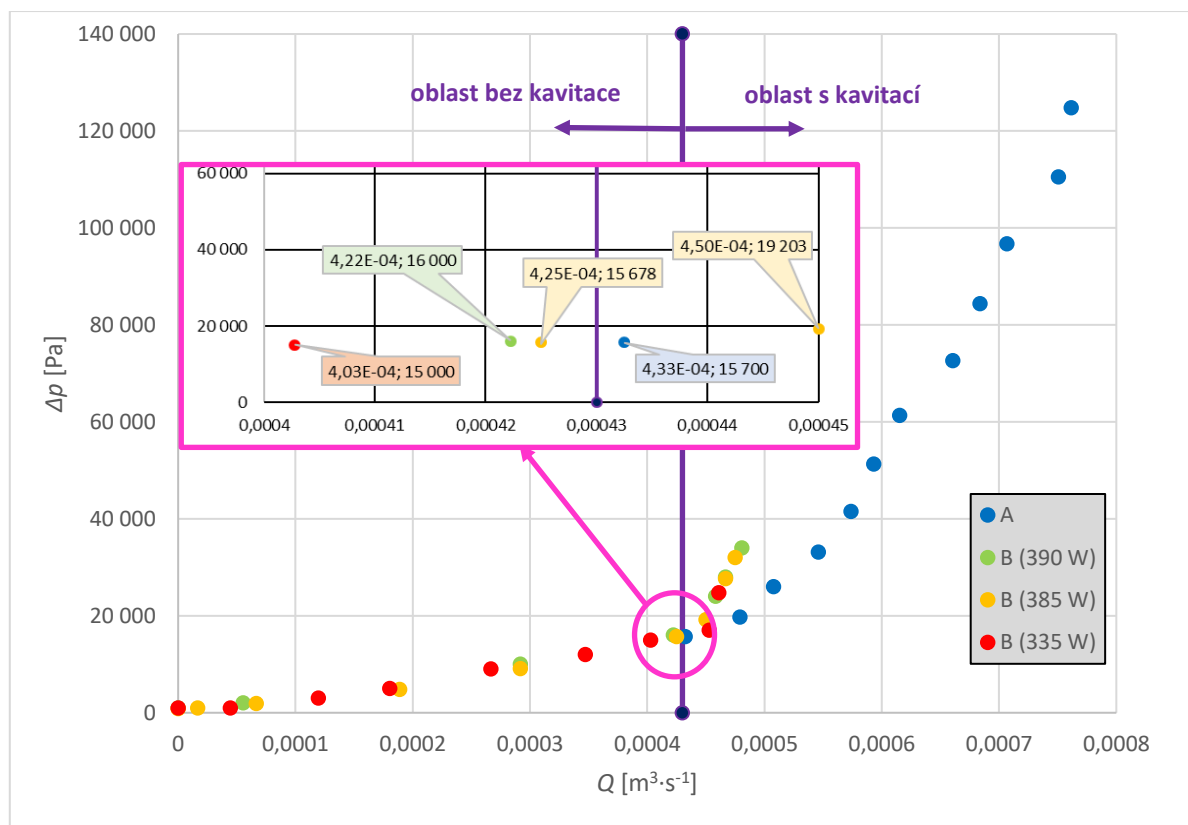
Δp	Q	v_{D1}	v_{D2}	p_2	p_{2abs}	K	ξ	μ
[Pa]	[m ³ ·s ⁻¹]	[m·s ⁻¹]	[m·s ⁻¹]	[Pa]	[Pa]	[1]	[1]	[1]
24 759	4,61E-04	16,31	1,47	4 889	106 489	0,7848	23,0	0,2084
17 000	4,53E-04	16,01	1,44	5 000	106 600	0,8148	16,4	0,2469
15 000	4,03E-04	14,25	1,28	4 000	105 600	1,0198	18,3	0,2338
12 000	3,47E-04	12,28	1,11	3 000	104 600	1,3589	19,7	0,2254
9 000	2,67E-04	9,43	0,85	2 000	103 600	2,2814	25,0	0,1999
5 000	1,81E-04	6,39	0,57	2 000	103 600	4,9764	30,3	0,1816
3 000	1,19E-04	4,22	0,38	2 000	103 600	11,3711	41,6	0,1551
1 000	4,44E-05	1,57	0,14	2 000	103 600	82,1297	100,1	0,0999
1 000	0	0	0	2 000	103 600	-	-	-

Re_{D1}	Re_{D2}	T	ρ_{O_2}	$\alpha_{O_2 \text{vstup}}$	$\alpha_{N_2 \text{vstup}}$	$\alpha_{\text{objemový-nádrž}}$		ρ_{vzduch}	Y
[1]	[1]	[K]	[kg·m ⁻³]	[1]	[1]	[1]	[%]	[kg·m ⁻³]	[1]
97 851	29 355	297,25	1,3156	0,0057	0,0214	0,0271	2,71	1,1906	3,32E-05
96 082	28 825	297,45	1,3147	0,0057	0,0213	0,0270	2,70	1,1898	3,31E-05
85 472	25 642	297,45	1,3147	0,0056	0,0211	0,0268	2,68	1,1898	3,28E-05
73 683	22 105	297,55	1,3142	0,0056	0,0210	0,0266	2,66	1,1894	3,26E-05
56 588	16 977	297,65	1,3138	0,0056	0,0209	0,0265	2,65	1,1890	3,24E-05
38 315	11 495	297,65	1,3138	0,0055	0,0208	0,0263	2,63	1,1890	3,22E-05
25 347	7 604	297,65	1,3138	0,0055	0,0208	0,0263	2,63	1,1890	3,22E-05
9 431	2 829	297,65	1,3138	0,0055	0,0207	0,0262	2,62	1,1890	3,21E-05
0	0	297,65	1,3138	0,0055	0,0207	0,0262	2,62	1,1890	3,21E-05

9.5. GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT

Tabulky vypočtených hodnot jsou nezbytnou složkou vyhodnocování, nenabídnou ovšem obecný přehled. Z tohoto důvodu je nezbytná také grafická analýza.

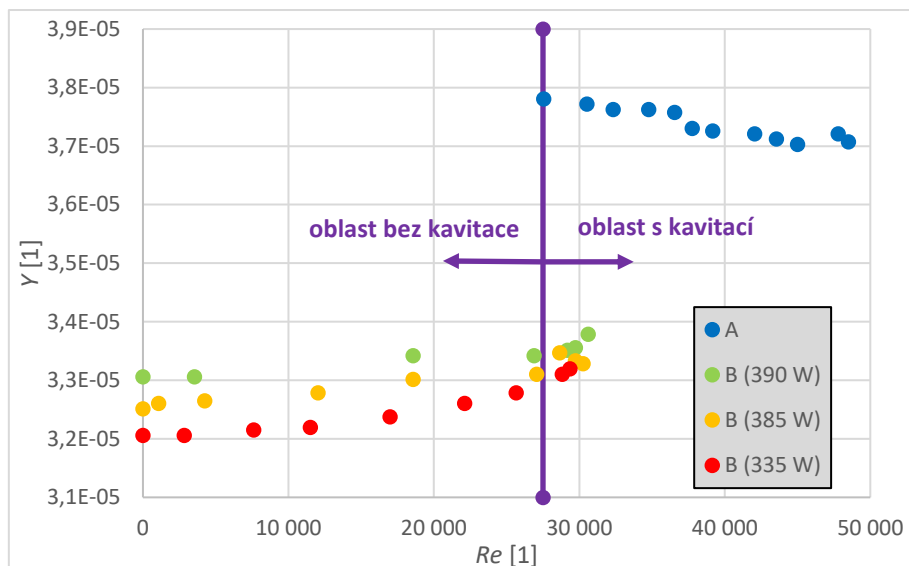
Na Obr. 9.1 je vidět závislost **průtoku Q** na **tlakové ztrátě Δp** .



Obr. 9.1 – Graf závislosti tlakové ztráty na průtoku

Z grafu je patrné, že tlaková ztráta roste společně s průtokem. Také je zřejmé, že ačkoliv bylo měření A prováděno na jiné trati než měření B, jeho hodnoty náležitě navazují na pomyslnou křivku hodnot z měření B. Jediná nesrovnalost nastává v místě vzniku kavitace, která se začala projevovat přibližně pro $Q = 0,00043 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kde se hodnoty tlakové ztráty pro měření B začaly prudce zvyšovat. Příčinami nesrovnalostí jsou pravděpodobně rozdílné vlastnosti obou tratí.

Dále jsem se rozhodl vyšetřit závislost **Reynoldsova čísla Re** v nejužším místě dýzy (pro hodnoty Re_{D2}) na **hmotnostním zlomku vzduchu v nádrži Y** . Tato závislost je vidět na Obr. 9.2.

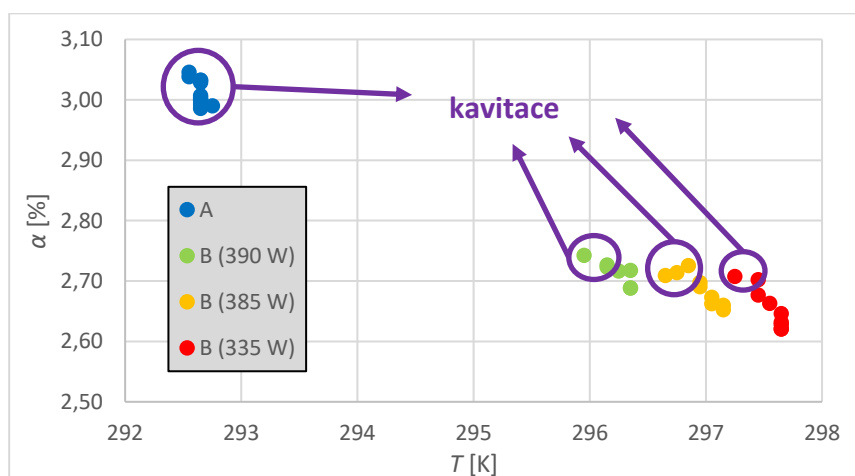


Obr. 9.2 – Graf závislosti Reynoldsova čísla na hmotnostním zlomku vzduchu

Hmotnostní zlomek byl pro jednotlivá měření téměř konstantní. Jelikož jsem měření uskutečnil na dvou různých tratích v různých časech a za různých teplot, nemohou na sebe měření na obvodě A a měření na obvodě B navazovat.

Závěrem je tedy fakt, že pro oblast bez kavitace, která dle pozorování vychází přibližně pro hodnotu Reynoldsova čísla **$Re = 27\,500$** , hodnoty hmotnostního zlomku vzduchu Y mírně stoupají. Oblast s kavitací však nemůžu vyhodnotit, neboť data nevykazují žádnou společnou charakteristiku. Možným řešením by bylo provést celou simulaci znova na trati, která je schopna pojmout celý interval měření.

V grafu na Obr. 9.3 je vidět závislost **objemového zlomku vzduchu α** na **termodynamické teplotě kapaliny T** .



Obr. 9.3 – Graf závislosti objemového zlomku vzduchu na teplotě

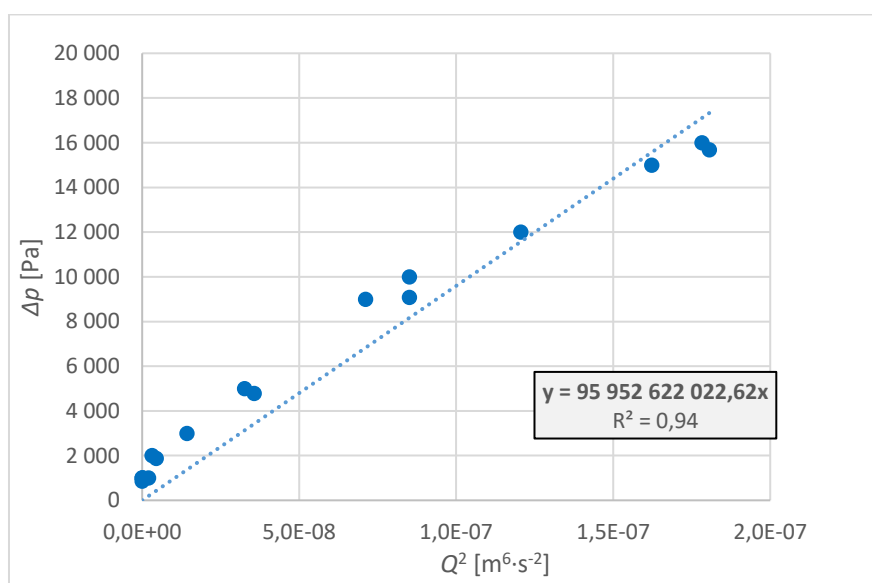
Jelikož se u měření na trati A kavitace projevila na celém intervalu, nelze v tomto případě dojít k žádnému závěru. Nejlepším příkladem jsou data z měření na trati B při výkonu 385 W. Jde na nich zřetelně vidět jak průběh při kavitaci, který má mírně stoupající tendenci, tak hodnoty bez kavitace, které mají výrazně klesající tendenci. Podobný, i když již ne tak zřetelný, průběh mají i hodnoty z měření na trati B při výkonech 390 W a 335 W.

V grafu navíc lze postřehnout zásadní nevýhodu tratě B, se kterou jsem bohužel předem nepočítal. Teplota kapaliny se během měření začala poměrně výrazně zvyšovat, po skončení měření se zvýšila o téměř 2 K. Zvýšení teploty tento rozbor příliš neovlivnilo, mohlo mít však vliv na jiné veličiny.

Dále jsem se chtěl zabývat závislostí mezi Reynoldsovým číslem a ztrátovým součinitelem. Pro úplné vyhodnocení bylo ale nejprve nutno zjistit odporový součinitel R , který je dán vztahem [12].

$$R = \frac{\Delta p}{Q^2}$$

Hodnotu R jsem získal ze směrnice funkce z hodnot bez kavitace z měření na obvodu B, viz Obr. 9.4.



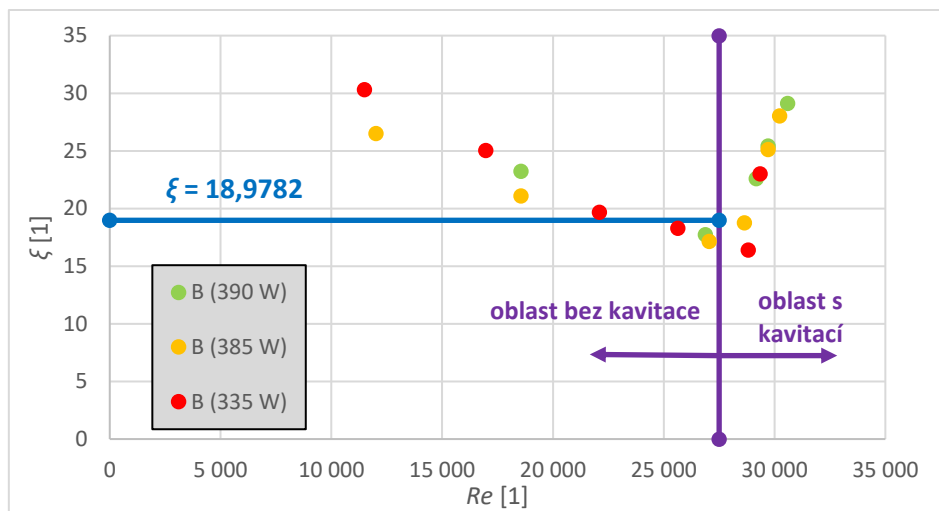
Obr. 9.4 – Graf závislosti tlakové ztráty na druhé mocnině průtoku

Z grafu vyplývá, že hodnota odporového součinitele bude $R = 95\,952\,622\,022,64 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-7}$. Tuto hodnotu dále použiji ve výpočtu ztráty a výtokového součinitele.

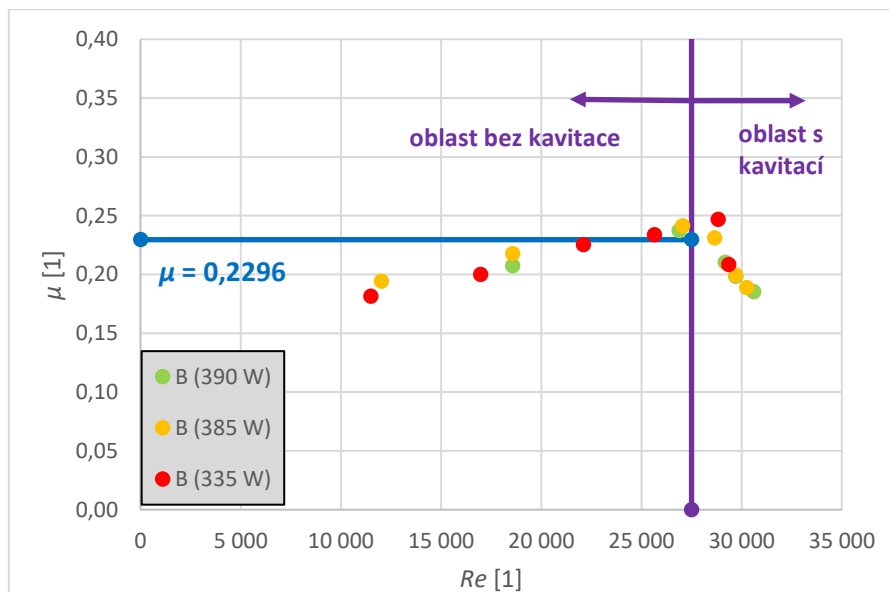
$$\xi = \frac{R \cdot \pi^2 \cdot D_2^4}{8 \cdot \rho} = \frac{95\,952\,622\,022,64 \cdot \pi^2 \cdot 0,02^4}{8 \cdot 998} = 18,9782$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi}} = \frac{1}{\sqrt{18,9782}} = 0,2296$$

Závislost ztráty na Reynoldsově čísle je vidět na Obr. 9.5, závislost výtokového součinitele na Reynoldsově čísle na Obr. 9.6.



Obr. 9.5 – Graf závislosti ztráty na Reynoldsově čísle



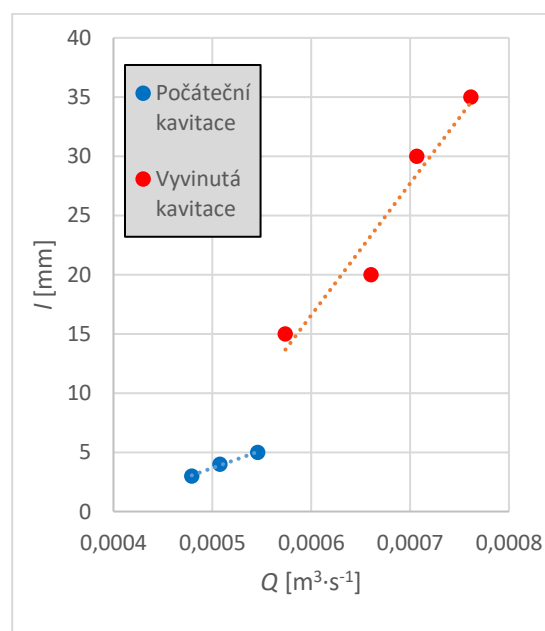
Obr. 9.6 – Graf závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle

Z grafu na Obr. 9.5 lze vypožorovat, že v oblasti bez kavitace se s rostoucím Reynoldsovým číslem ztráta snižuje. V oblasti kavitace se ale začne prudce zvyšovat. Z grafu na Obr. 9.6 lze vypožorovat opačný efekt. V oblasti bez kavitace se hodnota výtokového součinitele s rostoucím Reynoldsovým číslem mírně zvyšuje, v oblasti s kavitací naopak prudce klesá. Tyto poznatky poukazují na negativní vliv kavitace na proudění.

V grafu na Obr. 9.7 jsem se rozhodl definovat vliv průtoku na velikost kavitační oblasti pro měření na obvodu A. Hodnoty průtoku byly řádně změřeny, hodnoty velikostí kavitační oblasti byly odečteny z videozáznamů vysokorychlostní kamerou. Z toho důvodu velikost kavitační oblasti nebyla zprůměrována a data nejsou kompletně přesná. Pro tento rozbor jsem použil pouze data z měření na obvodu A a pouze ty hodnoty průtoku, za kterých byl pořízen videozáznam. Data jsou uvedena v Tab. 9.10.

Tab. 9.10 – Tabulka hodnot otáček, průtoku a velikosti kavitační oblasti

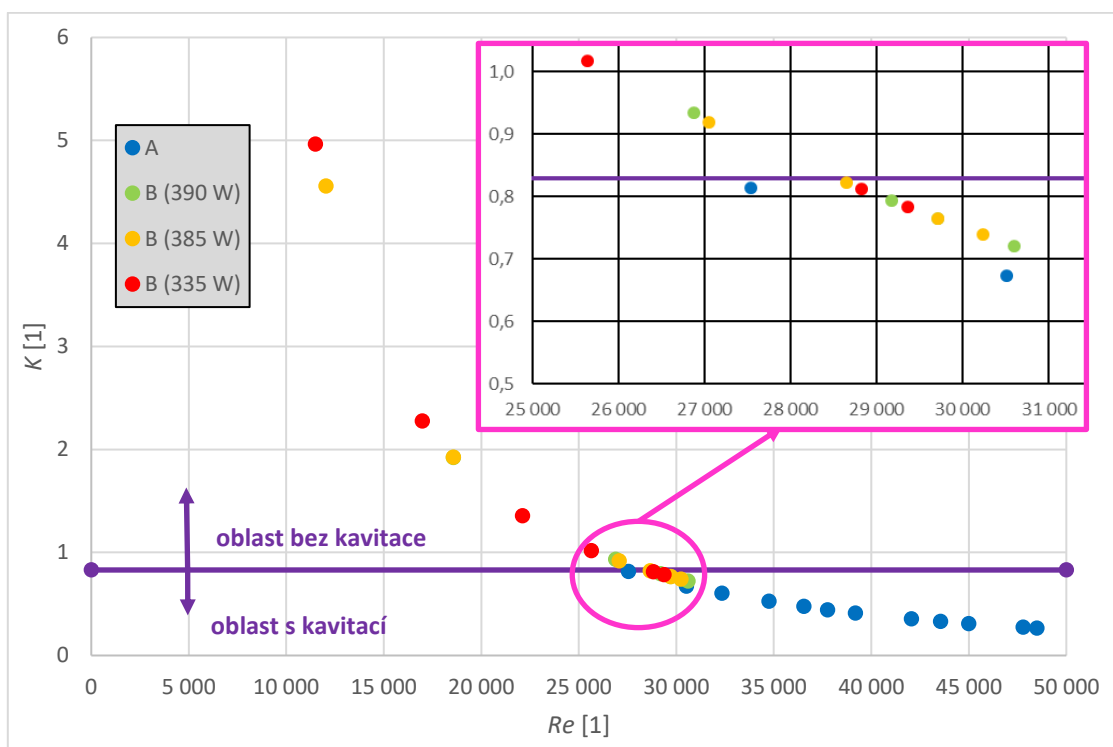
f [Hz]	Q [m ³ ·s ⁻¹]	l [mm]
8	0,000479	3
9	0,000508	4
10	0,000546	5
12	0,000574	15
14	0,000661	20
16	0,000707	30
18	0,000762	35



Obr. 9.7 – Graf závislosti velikosti kavitační oblasti na průtoku

Z grafu je patrné, že v oblasti s počáteční kavitací roste kavitační oblast v závislosti na průtoku jen mírně. V oblasti s vyvinutou kavitací je však nárůst velikosti kavitační oblasti výrazně prudší.

Vyhodnocení závislosti **Reynoldsova čísla Re** na **kavitační konstantě K** je patrné na Obr. 9.8.



Obr. 9.8 – Graf závislosti Reynoldsova čísla na kavitační konstantě

Z grafu je patrné, že s rostoucím Reynoldsovým číslem Re hodnoty kavitační konstanty K klesají. V místě vzniku kavitace, které dle pozorování vychází přibližně pro hodnotu počátku kavitace $K = 0,83$, se hodnoty začínají mírně ustalovat.

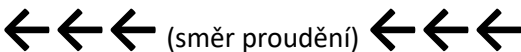
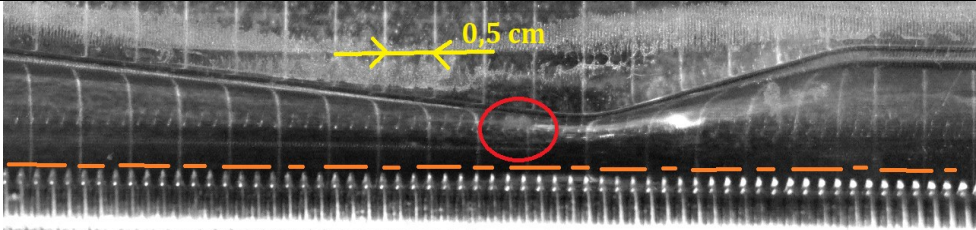
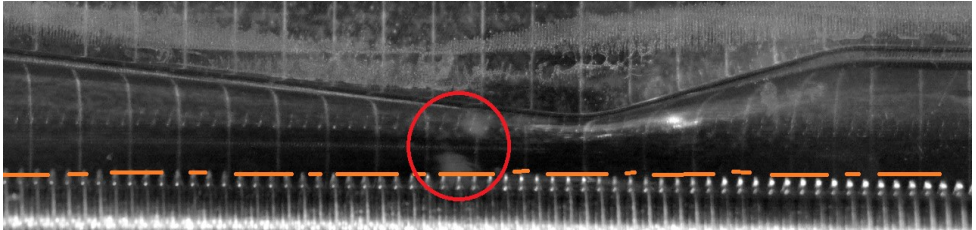
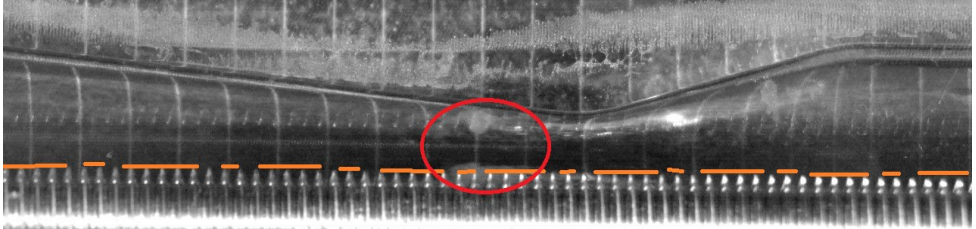
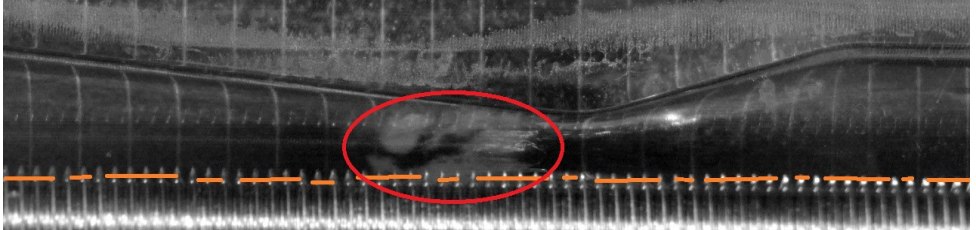
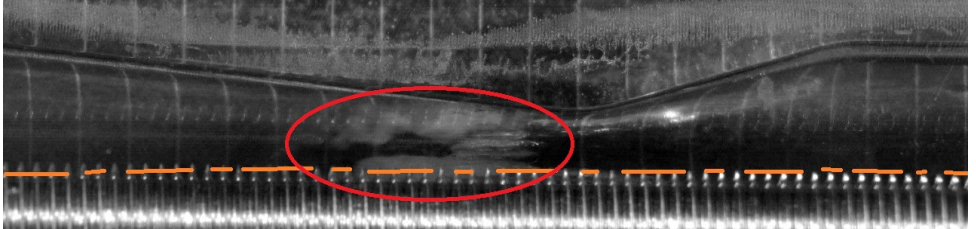

9.6. VYHODNOCENÍ VIDEOZÁZNAMŮ

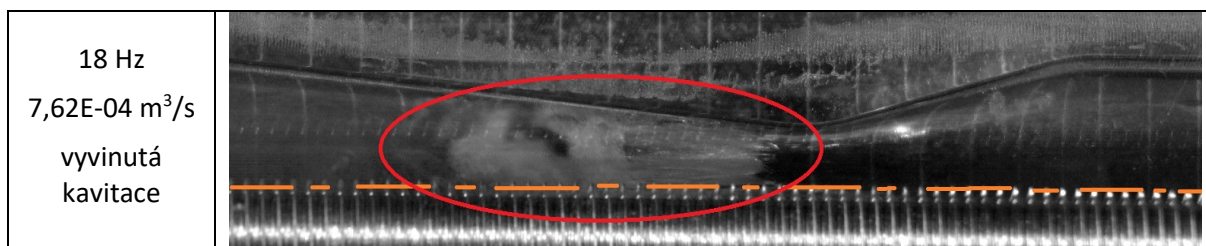
Jelikož je kavitace komplikovaný a nestacionární děj, u kterého se změny projevují na velmi malém časovém úseku, rozhodl jsem se měření na obvodu A doplnit také videozáznamem digitální vysokorychlostní kamerou Mini UX50. Záznam jsem pořídil ve formátu tif a následně zpracoval v programu PFV4. Snímal jsem 8 000 snímků/s s rozlišením 1280 x 296 pixel.

Záznamy byly pořízeny pouze pro měření na obvodu A a pouze pro určité hodnoty otáček. Byly pořízeny záznamy pro hodnoty otáček 8, 9, 10, 12, 14, 16 a 18 Hz.

Vzhledem ke způsobu, jakým byla dýza nainstalována do obvodu a faktu, že kamera musí při snímání být ve vodorovné pozici s dýzou, je záznam naneštěstí částečně zastíněn závitem sloužícím k uchycení dýzy. Tento problém nebylo možno vyřešit bez rozebrání velké části obvodu, tudíž jsem se rozhodl dýzu v tomto stavu ponechat.

Tab. 9.11 – Tabulka kavitačních oblastí pro obvod A

otáčky průtok druh kavitace	
8 Hz $4,79E-04 \text{ m}^3/\text{s}$ počáteční kavitace	
9 Hz $5,08E-04 \text{ m}^3/\text{s}$ počáteční kavitace	
10 Hz $5,46E-04 \text{ m}^3/\text{s}$ počáteční kavitace	
12 Hz $5,93E-04 \text{ m}^3/\text{s}$ vyvinutá kavitace	
14 Hz $6,61E-04 \text{ m}^3/\text{s}$ vyvinutá kavitace	
16 Hz $7,07E-04 \text{ m}^3/\text{s}$ vyvinutá kavitace	



Ze záznamů je patrné, že při otáčkách do 10 Hz dochází pouze k počáteční kavitaci. Stupnice viditelná na fotkách je v intervalu 5 mm. Při nízkých otáčkách kavitace dosáhla vzdálenosti přibližně 1 článku, tedy 5 mm. Vyvinutá kavitace však dosahovala mnohem vyšších hodnot, od 3 do 6 článků délky, neboli 15 až 30 mm.

Celý záznam byl pořízen za pomoci vysokorychlostní kamery Mini UX50. Pro zajištění lepší viditelnosti byly v místnosti zatažené žaluzie a vypnuto umělé osvětlení. Samotná dýza byla následně uměle osvětlena speciálními reflektory. Kamera a reflektory jsou vidět na Obr. 9.9, a samotné podmínky během pořizování záznamu jsou vidět na Obr. 9.10.

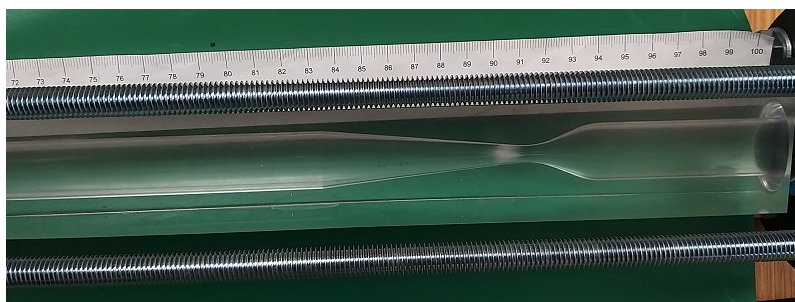


Obr. 9.9 – Vysokorychlostní kamera a reflektory



Obr. 9.10 – Místnost během pořizování videozáznamu

Pro měření na obvodu B již vysokorychlostní kamera použita nebyla. Hlavním důvodem byla komplikovaná instalace kamery a reflektorů a také fakt, že se nepředpokládalo, že by se během měření projevila vyvinutá kavitace. Podařilo se mi ovšem pořídit záběr počáteční kavitace pro **výkon $P = 385 \text{ W}$** a **průtok $Q = 4,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$** , viz Obr. 9.11. Tato kavitace dosahovala délky mezi 5 a 10 mm.



Obr. 9.11 – Počáteční kavitace při měření na obvodu B

10. ZÁVĚR

Cílem práce bylo vyhodnotit charakteristiku konvergentní – divergentní dýzy kruhového průřezu a definovat počáteční kavitační číslo.

V rešeršní části jsem zpracoval teorii převážně ke kavitaci, včetně jejích účinků, jejího využití a vlivů fyzikálních vlastností kapaliny na její vznik.

V praktické části jsem popsal tratě pro měření charakteristiky dýzy a vytvořil jsem metodiku měření. Měření bylo nejprve provedeno v laboratoři katedry Hydromechaniky a hydraulických zařízení v místnosti N108, kde však nebylo možné naměřit charakteristiku bez kavitace, proto jsem využil také laboratoř E306. Dýzu jsem umístil do obvodu s méně výkonným čerpadlem a proměřil jsem opět charakteristiku. Na místnosti N108 jsem snímal kavitační oblast vysokorychlostní kamerou, na místnosti E306 nikoliv.

Obě měření byla provedena v turbulentním režimu proudění, při odlišných teplotách, bylo snímáno množství kyslíku v nádrži, tlaky a průtoky.

Z naměřených hodnot je patrné, že je nutné vyhodnocovat ztrátový součinitel ξ pouze tehdy, když nevzniká kavitace, jelikož výsledná hodnota ztráty by byla zatížena velkou nepřesností, jak je patrné z Obr. 9.1. Ztrátový součinitel pro dýzu je 18,98 a výtokový součinitel je 0,23. Objemový zlomek vzduchu vyšel kolem 3 %, avšak při měřeních nebyl stejný, jelikož se měření provádělo při různých teplotách a v různých časových okamžicích. Pro danou geometrii dýzy bylo určeno počáteční kavitační číslo 0,83.

Jelikož je dýza transparentní, mohla být vyhodnocena pomocí vysokorychlostní kamery velikost kavitační oblasti. Výsledky jsou patrné na Obr. 9.7 a v Tab. 9.11, kde bylo dosaženo počáteční i vyvinuté kavitace.

Měření lze srovnat s měřením na olejové trati a srovnat kavitační parametr. Kompletní měření bude dále využíváno k matematickému modelování a definování modelů.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce, Ing. Janě Jablonské, Ph.D., za její trpělivost, ochotu a cenné rady při zpracovávání této práce, a také za nesmírnou pomoc při měřeních v praktické části.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír. Kavitace. Praha: Academia, 1969.
- [2] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00206-0.
- [3] BRDIČKA, Miroslav, Oldřich TARABA a Ladislav SAMEK. Kavitace: diagnostika a technické využití. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. Technická knižnice inženýra.
- [4] Cavitation in medicine. [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4549847/>
- [5] PASTRŇÁK, Lukáš. Měření hydraulických parametrů na olejové trati s dýzou. Ostrava, 2019. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [6] Rozpustnost plynů ve vodě. [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: http://planta.aquariana.cz/plyny_ve_vode.htm
- [7] Aktuální počasí: Ostrava-Výškovice [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/dok/V76qqhBkBiUCKhMO>
- [8] Aktuální počasí: Ostrava-Výškovice [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/aktualni-pocasi/ostrava/?historie=2021-04-08>
- [9] Periodická tabulka: Fyzikální charakteristiky vody [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/voda.html>
- [10] Periodická soustava prvků dle IUPAC. Osobní webové stránky Ladislava Nádherného na VŠCHT Praha [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2017 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/~nadhernl/psp.html>
- [11] VŠCHT: Příkladník [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.1.1.2.html>
- [12] Bojko, Marian & Kozubková, Milada & Jablonská, Jana. (2020). Cavitation Flow of Oil and Water Through the Nozzle. MATEC Web of Conferences. 328. 03012. 10.1051/mateconf/202032803012.
- [13] KARELIN, V. J. Kavitationnyje javlenija v centroběžnyh i osevyh nasosach. Moskva: Mašinostrojenije, 1975.
- [14] HUTTON, S. P. & FURNESS, R. A. Thermodynamic Scale Effects in Cavitating Flows and Pump. Edinburgh, 1974.
- [15] Kavitace. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>
- [16] DAILY J. W., JOHNSON V. E.: Turbulence and Boundary-Layer Effects of Cavitation Inception From Gas Nuclei. Symposium London, 1955.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Geometrie měřeného prvku

